



# MITIGAÇÃO DAS CAUSAS GERADORAS DE DEFEITOS EM PEÇAS METÁLICAS INJETADAS DE CARÁTER ESTÉTICO

**DIANA CATARINA CAPELA FERREIRA**

julho de 2017

## **MITIGAÇÃO DAS CAUSAS GERADORAS DE DEFEITOS EM PEÇAS METÁLICAS INJETADAS DE CARÁTER ESTÉTICO**

Diana Catarina Capela Ferreira

**2017**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Engenharia Mecânica – Materiais e Tecnologias de Fabrico



## **MITIGAÇÃO DAS CAUSAS GERADORAS DE DEFEITOS EM PEÇAS METÁLICAS INJETADAS DE CARÁTER ESTÉTICO**

Diana Catarina Capela Ferreira

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Francisco José Gomes da Silva, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP e com a Co-orientação do Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP.

**2017**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Engenharia Mecânica – Materiais e Tecnologias de Fabrico





## JÚRI

### **Presidente**

Doutor Rui Pedro Cardoso da Silva Martinho

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

### **Orientador**

Doutor Francisco José Gomes da Silva

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

### **Co-orientador**

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

### **Arguente**

Doutora Maria de Fátima de Almeida Ferreira

Professora Adjunta Convidada, Escola Superior de Tecnologia



## AGRADECIMENTOS

A todos os que de alguma forma contribuíram para o meu percurso, quero aqui deixar o meu muito obrigada.

Em particular, ao Eng.º Francisco Silva e ao Eng.º Mário Cardoso, pela disponibilidade, apoio, orientação e dedicação neste trabalho.

Ao Eng. Raul Campilho pela disponibilidade e orientação dada ao longo deste desafio.

À minha família por todo o apoio e carinho.

E em especial ao meu noivo, João Matos, por tudo e mais alguma coisa. Pelo apoio incondicional, pela força, pela paciência, pelo carinho, pela preocupação, pela amizade, pelas brincadeiras, pelas picardias, pelo companheirismo, por estares ao meu lado sempre, por tudo isto, muito obrigada, meu amor.



**PALAVRAS CHAVE**

Molde, Fundição injetada, Defeitos de fundição injetada, Injeção câmara quente, *SolidCast™*, Parâmetros de injeção, Simulação numérica, Linhas de solidificação.

**RESUMO**

A realização deste trabalho inseriu-se no âmbito de um estudo de otimização dos parâmetros de injeção de uma peça estética em liga Zamak, a obter através de uma única operação de fundição injetada. A fundição injetada consiste, fundamentalmente, na injeção de um metal fundido para o interior das cavidades de um molde permanente. O trabalho foi realizado em parceria com a empresa PR-Metal, Lda., na Maia, a qual teve uma presença ativa neste estudo, já que todas as alterações necessárias foram implementadas por esta. Com vista a obter peças de Zamak sem defeito, e com uma boa aparência estética, foi necessário estudar o problema para depois tentar encontrar a melhor solução possível. Assim, recorreu-se ao estudo da fundição, em particular da fundição injetada, e do material, para depois efetuar uma análise concreta do problema e traçar o caminho a seguir. Ao longo do trabalho, para resolução do problema, foram realizadas simulações numéricas através do *software SolidCast™*, estudo do fluxo do material no molde e correspondentes linhas de fusão, realizados ensaios empíricos no molde tendo em conta os resultados das simulações e a correspondente variação de parâmetros, alterações efetivas no molde, entre outros passos, até chegar ao resultado final apresentado. De salientar que, no final, se conclui essencialmente que são necessárias elevadas pressões de injeção para obter peças bem compactadas, bem como se deve ter em conta a presença de gases, temperatura de material e o próprio material a usar para produzir as peças desejadas. De referir também que, sem a existência de uma pressão de manutenção, a acomodação do material nas cavidades tornar-se-ia deveras mais difícil.



**KEYWORDS**

*Mould, High-Pressure die casting, High-Pressure die casting defects, Hot chamber high-pressure die casting, SolidCast™, injection parameters, numerical simulation, solidification lines.*

**ABSTRACT**

*This work was carried out aiming to optimize the injection parameters and mould configuration of a Zamak alloy aesthetic part, to be obtained through a single injected casting operation. The high-pressure die casting essentially consists of injecting a molten metal into the cavities of a permanent mould. The work was developed in partnership with the company PR-Metal, Lda., in Maia, which had an active collaboration in this study, since all necessary changes were implemented by them. In order to obtain healthy, defect-free Zamak parts with a good aesthetic appearance, it was necessary to study the problem and then try to find the best possible solution. Thus, a study was carried out about the casting processes, in particular of the high-pressure die casting, and about the material, and then a deep analysis of the problem was undertaken the path to follow outlined. Throughout the work, and in order to solve the problem, numerical simulations were carried out using the SolidCast™ software, the material flow in the mould and corresponding fusion lines were studied, empirical tests were carried out in the mould taking into account the results of the simulations and the corresponding variation of parameters, effective changes in the mould, among other steps, until reaching the final result presented in this report. It should be noted that, at the end, it is essentially concluded that high injection pressures are required to obtain well compacted parts. Additionally, well as to take into account the presence of gases, material temperature and the material to be used should be taken into account to produce the desired parts. It should also be noted that without the existence of a maintenance pressure, the material accommodation into the mould would become more difficult.*





## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

<b>Termo</b>	<b>Designação</b>
EPE	Polietileno Expandido
MEM	Mestrado em Engenharia Mecânica
PE	Polietileno
PP	Polipropileno
SWOT	<i>Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats</i>
UC	Unidade Curricular

### Lista de Unidades

<b>Termo</b>	<b>Designação</b>
% IACS	<i>International Annealed Copper Standard</i> – Padrão internacional de Cobre temperado
°C	Grau Celsius
°F	Grau fahrenheit
μin	Micropolegadas
μm	Micrómetros
BHN	Dureza de Brinell
BTU	<i>British Thermal Unit</i> – Unidade térmica britânica
ft	Pés
g	Grama
h	Hora
in <sup>3</sup>	Polegadas cúbicas
J	Joule
kg	Kilograma
lb	Libra
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
MPa	MegaPascal
s	Segundo
W	Watt
Ω	Ohm



## GLOSSÁRIO DE TERMOS

Termo	Designação
Al	Alumínio
Cd	Cádmio
Cu	Cobre
Critério de Niyama	É usado para prever regiões na peça fundida onde os rechupes ou porosidades são mais prováveis. $Niyama = G/\sqrt{R}$ , onde G é o gradiente de temperatura e R é a taxa de arrefecimento.
Diagrama de Ishikawa	Diagrama espinha de peixe
Fe	Ferro
<i>Investment Casting</i>	Fundição de precisão por cera perdida
<i>Layout</i>	Disposição física
<i>Mesh</i>	Malha de elementos finitos
Mg	Magnésio
Ni	Níquel
Ø	Diâmetro
Pb	Chumbo
<i>Posteriori</i>	Posteriormente
Pressão de manutenção	Pressão após pressão de injeção
Si	Sílica
Sn	Estanho
SolidCast™	<i>Software</i> de simulação de injeção fundida
<i>Tab</i>	Janela de um menu
Zamak	Zink-Aluminium-Magnesium-Kupfer (Zinco, Alumínio, Magnésio e Cobre)
Zn	Zinco



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - VAZAMENTO DE METAL FUNDIDO PARA UMA MOLDAÇÃO [2] .....	6
FIGURA 2 - DESCRIÇÃO DOS ELEMENTOS ESSENCIAIS DE UMA MOLDAÇÃO [3] .....	7
FIGURA 3 - CONSTITUIÇÃO DE UMA MOLDAÇÃO EM AREIA VERDE [6] .....	9
FIGURA 4 - COLHER DE VAZAMENTO E ELEMENTOS CONSTITUINTES DE UMA MOLDAÇÃO NÃO- PERMANENTE PARA FUNDIÇÃO EM AREIA VERDE [7] .....	9
FIGURA 5 - PREENCHIMENTO DO ESPAÇO LIVRE NO MOLDE PELO METAL FUNDIDO [7] .....	10
FIGURA 6 - SEQUÊNCIA DE DESMOLDAÇÃO, EXTRAÇÃO DO MACHO E CORTE DE CANAIS DE ALIMENTAÇÃO [6] .....	10
FIGURA 7 - PEÇA FUNDIDA FINAL [6] .....	11
FIGURA 8 - FASES DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO EM GESSO [3] .....	13
FIGURA 9 - FLUXO DE ENCHIMENTO POR BAIXA PRESSÃO [23] .....	15
FIGURA 11 - CENTRIFUGAÇÃO PURA VERTICAL [26] .....	16
FIGURA 10 - CENTRIFUGAÇÃO PURA HORIZONTAL [25] .....	16
FIGURA 12 - EXEMPLO DE MOLDE DE FUNDIÇÃO POR SEMI-CENTRIFUGAÇÃO [27] .....	16
FIGURA 13 - EXEMPLO DE FUNCIONAMENTO DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO POR CENTRIFUGAÇÃO [3] ..	17
FIGURA 14 - EXEMPLO DE MOLDAÇÃO EM AREIA [30] .....	18
FIGURA 15 - EXEMPLO DE MOLDE PERMANENTE [30] .....	19
FIGURA 16 - ÁREAS CONSTITUINTES DE UMA MÁQUINA DE INJEÇÃO EM CÂMARA FRIA [33] .....	21
FIGURA 17 - EXEMPLO DE MÁQUINA DE INJEÇÃO POR CÂMARA FRIA [34] .....	21
FIGURA 18 - VAZAR O METAL FUNDIDO PARA A CÂMARA DE INJEÇÃO [35] .....	22
FIGURA 19 - ENCHIMENTO DAS CAVIDADES PROMOVIDO PELA AÇÃO DO PISTÃO [35] .....	22
FIGURA 20 - RECOLHA DO ÊMBOLO E ABERTURA DO MOLDE [35] .....	22
FIGURA 21 - ÁREAS CONSTITUINTES DE UMA MÁQUINA DE INJEÇÃO EM CÂMARA QUENTE [36] .....	23
FIGURA 22 - EXEMPLO DE MÁQUINA DE INJEÇÃO POR CÂMARA QUENTE DE 15 TONELADAS DE PRESSÃO DE FECHO [37] .....	23
FIGURA 23 - RECOLHA DO PISTÃO COM O MOLDE FECHADO [38] .....	24
FIGURA 24 - PISTÃO É EMPURRADO PARA INICIAR A INJEÇÃO DO METAL FUNDIDO NO MOLDE [38] .....	24
FIGURA 25 - RECOLHA DO PISTÃO E ABERTURA DO MOLDE [39] .....	25
FIGURA 26 - EXEMPLO DE POROSIDADES [44-45] .....	26
FIGURA 27 - EXEMPLO DE PREENCHIMENTO DEFICIENTE [45] .....	27
FIGURA 28 - EXEMPLO DE GOTAS FRIAS [45] .....	27
FIGURA 29 - EXEMPLO DE REBARBA [45] .....	28
FIGURA 30 - EXEMPLO DE DESENCONTRO [47] .....	28
FIGURA 31 - EXEMPLO DE RECHUPES [45,48] .....	28
FIGURA 32 - EXEMPLO DE FISSURAS [44] .....	29
FIGURA 33 - EXEMPLO DE MARCAS DE FADIGA TÉRMICA [49] .....	30
FIGURA 34- EXEMPLO DE PEÇAS EM ZAMAK [54-57] .....	36

FIGURA 35 - ANÁLISE DE RESULTADOS ATRAVÉS DO <i>SOFTWARE</i> QUIKCAST [59] .....	38
FIGURA 36 - ANÁLISE DE RESULTADOS ATRAVÉS DO <i>SOFTWARE</i> PROCAST [60] .....	39
FIGURA 37 - ANÁLISE DE RESULTADOS ATRAVÉS DO <i>SOFTWARE</i> Salsa 3D [61] .....	39
FIGURA 38 - ANÁLISE DE RESULTADOS ATRAVÉS DO <i>SOFTWARE</i> FLOW 3D [63] .....	40
FIGURA 39 - MENU PARA ACEDER À LISTA DE MATERIAIS NO SOLIDCAST™ .....	41
FIGURA 40 - PARAMETRIZAÇÃO DOS MATERIAIS EM SOLIDCAST™ .....	41
FIGURA 41 - PARAMETRIZAÇÃO DO MATERIAL DO MOLDE EM SOLIDCAST™ .....	42
FIGURA 42 - PARAMETRIZAÇÃO DOS COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA TÉRMICA EM SOLIDCAST™ .....	43
FIGURA 43 - CRIAÇÃO DA <i>MESH</i> EM SOLIDCAST™ .....	43
FIGURA 44 - PARAMETRIZAÇÃO DA <i>MESH</i> EM SOLIDCAST™ .....	44
FIGURA 45 - REALIZAÇÃO DA <i>MESH</i> EM SOLIDCAST™ .....	44
FIGURA 46 - MENU PARA INICIAR A SIMULAÇÃO EM SOLIDCAST™ .....	44
FIGURA 47 - PARÂMETROS DO SISTEMA EM SOLIDCAST™ .....	45
FIGURA 48 - PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO EM SOLIDCAST™ .....	45
FIGURA 49 - IMAGEM EXEMPLIFICATIVA DE ANÁLISE DE RESULTADOS ATRAVÉS DO <i>SOFTWARE</i> FLOWCAST .....	46
FIGURA 50 - IMAGEM EXEMPLIFICATIVA DE ANÁLISE DE RESULTADOS ATRAVÉS DO <i>SOFTWARE</i> SOLIDCAST™ .....	46
FIGURA 51 - LOGÓTIPO DA PR-METAL, LDA. ....	48
FIGURA 52 - CONJUNTO DE EMPRESAS ONDE ESTÁ INSERIDA A PR – METAL, LDA.....	48
FIGURA 53 - EXEMPLO DE CABO PARA A INDÚSTRIA AUTOMÓVEL COM INJEÇÃO PARCIAL DE ZAMAK ..	49
FIGURA 54 - CHAPA PARA MALA CAVALINHO® .....	49
FIGURA 55 - EVOLUÇÃO DO PROJETO .....	51
FIGURA 56 - MÁQUINA DE INJEÇÃO ZM3 E CÂMARA QUENTE DE INJEÇÃO .....	52
FIGURA 57 - SISTEMA DE INJEÇÃO .....	52
FIGURA 58 - DIREÇÃO DA INJEÇÃO DO METAL FUNDIDO .....	53
FIGURA 59 - GEOMETRIA E DIMENSÕES DO BICO DE INJEÇÃO UTILIZADO .....	53
FIGURA 60 - MODELO 3D DA CHAPA E PORMENOR DO MODELO, À DIREITA .....	54
FIGURA 61 - LEGENDA DAS DIFERENTES ZONAS DA PEÇA – À ESQUERDA O LADO FRONTAL DA PEÇA, À DIREITA O LADO TRASEIRO DA MESMA.....	54
FIGURA 62 - DIAGRAMA DE ISHIKAWA PARA ANÁLISE DAS CAUSAS DO PROBLEMA .....	56
FIGURA 63 - ENSAIO A1 - MZ5P4TE03TA05TS0MS – PEÇA COM MUITAS MARCAS DE FLUXO.....	57
FIGURA 64 – ENSAIO A2 - MZ5P05TE02TA05TS0MS – PEÇA COM PREENCHIMENTO DEFICIENTE E MARCAS DE FLUXO .....	58
FIGURA 65 - ENSAIO A4 - MZ5P1TE02TA05TS0MS – PEÇA INCOMPLETA COM PERCEÇÃO DO FLUXO DE ENCHIMENTO.....	58
FIGURA 66 - ENSAIO A5 - MZ5P15TE02TA05TS0MS – PEÇA INCOMPLETA E COM POROS.....	59
FIGURA 67 - ENSAIO A6 - MZ5P2TE02TA05TS0MS – PEÇA COM MANCHAS E POROS .....	60
FIGURA 68 - ENSAIO A7 - MZ5P2TE025TA05TS0MS – PEÇA COM POROS E FISSURAS .....	60
FIGURA 69 - ENSAIO A8 - MZ5P1TE1TA1TS0MS – PEÇA COM MARCAS DE FLUXO E ZONAS “LIMPAS” .....	61
FIGURA 70 - ENSAIO A9 - MZ5P15TE02TA05TS0MS – PEÇA QUASE COMPLETA, MAS COM FRACA QUALIDADE NO ASPETO VISUAL.....	61
FIGURA 71 - FLUXO DE ENCHIMENTO DA PEÇA INJETADA COM ZAMAK 5.....	62

FIGURA 72 - ENSAIO B1 - MZ5P25TE6TA002TS2MS – PEÇA COM MARCAS DE FLUXO E ALGUMAS REBARBAS ASSINALADAS .....	63
FIGURA 73 - ENSAIO B2 - MZ5P5TE6TA002TS2MS – PORMENOR DA PAREDE SOLDADA NO MOLDE E PEÇA OBTIDA POR AÇÃO DA PRESSÃO UTILIZADA, ASSINALADA À ESQUERDA .....	64
FIGURA 74 - ENSAIO B3 - MZ5P1TE6TA002TS2MS – PEÇA COM MARCAS DE FLUXO, REBARBAS E PREENCHIMENTO DEFICIENTE NOS PINOS TRASEIROS .....	64
FIGURA 75 - ENSAIO B4 - MZ5P05TE6TA002TS2MS – PEÇA COM FISSURA ACENTUADA NO CENTRO DA ZONA DE INJEÇÃO E PREENCHIMENTO DEFICIENTE NOS PINS TRASEIROS .....	65
FIGURA 76 - ENSAIO B5 - MZ5P02TE6TA001TS2MS – PEÇA COM ASPETO FLUIDO, PREENCHIMENTO DEFICIENTE E FISSURA CENTRAL .....	66
FIGURA 77 - ENSAIO B6 - MZ5P03TE6TA001TS2MS – PEÇA COM FISSURA CENTRAL .....	66
FIGURA 78 - ENSAIO B6 - MZ5P03TE6TA001TS2MS – PEÇA FISSURA CENTRAL ACENTUADA E REBARBAS .....	67
FIGURA 79 - ENSAIO B7 - MZ5P03TE6TA005TS2MS – PEÇA COM FISSURA CENTRAL ASSINALADA E FISSURAS NA ZONA DAS LETRAS .....	67
FIGURA 80 - ENSAIO B8 - MZ5P03TE6TA003TS2MS – PEÇA COM PREENCHIMENTO DEFICIENTE ASSINALADA NA ZONA DE INJEÇÃO, APARECIMENTO DE MANCHAS VISÍVEIS NA 2ª FOTOGRAFIA DA ESQUERDA PARA A DIREITA .....	68
FIGURA 81 - ENSAIO B9 - MZ5P03TE10TA001TS2MS – PEÇA COM MANCHAS “BAÇAS” E PREENCHIMENTO DEFICIENTE EM ALGUNS PONTOS ASSINALADOS .....	68
FIGURA 82 - ENSAIO B10 - MZ5P03TE5TA001TS2MS – PEÇA COM PREENCHIMENTO DEFICIENTE ACENTUADA NA ZONA DA INJEÇÃO DO MATERIAL .....	69
FIGURA 83 - ENSAIO B11 - MZ5P06TE5TA001TS2MS – PEÇA COM MARCAS DE FLUXO E TURBULÊNCIA NA ZONA DE INJEÇÃO .....	70
FIGURA 84 - ENSAIO B12 - MZ5P04TE5TA001TS2MS – PEÇA COM FISSURA ACENTUADA NA ZONA DE INJEÇÃO E PREENCHIMENTO DEFICIENTE NOS PINOS TRASEIROS PORMENOR DA FISSURA NO CENTRO DA ZONA DE INJEÇÃO À DIREITA .....	70
FIGURA 85 - ENSAIO B13 - MZ5P05TE5TA001TS2MS – PEÇA COM PREENCHIMENTO DEFICIENTE ACENTUADA NOS PINOS .....	71
FIGURA 86 - EXEMPLO DE PREENCHIMENTO DEFICIENTE NOS PINOS TRASEIROS .....	71
FIGURA 87 - EXEMPLO DE MARCAS DE FLUXO .....	72
FIGURA 88 - EXEMPLO DE PREENCHIMENTO DEFICIENTE NA ZONA DE INJEÇÃO .....	72
FIGURA 89 - EXEMPLO DE TURBULÊNCIA NA ZONA DAS LETRAS .....	72
FIGURA 90 - EXEMPLO DE FISSURA CENTRAL .....	72
FIGURA 91 - EXEMPLO DE MARCA DE FLUXO NA LATERAL DA PEÇA .....	73
FIGURA 92 - DIÂMETRO INTERNO DA BOMBA ANTERIORMENTE UTILIZADA (ø40,10 MM) .....	73
FIGURA 93 - PEÇAS EXEMPLO DO TERCEIRO ENSAIO COM ZAMAK 5 E BOMBA DE 19 MM .....	74
FIGURA 94 - ENSAIO C1 - MZ3P05TE6TA005TS05MS – PEÇAS COM FISSURA CENTRAL .....	76
FIGURA 95 - ENSAIO C3 - MZ3P05TE6TA005TS05MS – PEÇA COM MAIOR TURBULÊNCIA NO MATERIAL .....	77
FIGURA 96 - ENSAIO C4 - MZ3P05TE6TA005TS05MS – PEÇA COM MAU ASPETO VISUAL .....	77
FIGURA 97 - ENSAIO C5 - MZ3P05TE6TA005TS05MS – PEÇA COM FISSURAS E MARCAS DE FLUXO .....	78
FIGURA 98 - ENSAIO C6 - MZ3P05TE6TA005TS05MS – PEÇA COM FRACO ASPETO VISUAL E COM PREENCHIMENTO DEFICIENTE EM DOIS SÍTIOS DISTINTOS .....	79



FIGURA 99 - ENSAIO C7 - MZ3P05TE6TA005TS05MS – PEÇA COM NOVAS FISSURAS NA LINHA DE UNIÃO DE MATERIAL, ASSINALADAS NA IMAGEM .....	79
FIGURA 100 - ENSAIO C8 - MZ3P05TE6TA005TS05MS – PEÇA INCOMPLETA E ONDE É POSSÍVEL OBSERVAR UM FLUXO DE ENCHIMENTO DIFERENTE DO OBTIDO COM ZAMAK 5.....	80
FIGURA 101 - ENSAIO C9 - MZ3P05TE6TA005TS05MS – PEÇA INCOMPLETA E COM MARCAS DE FLUXO	81
FIGURA 102 - ENSAIO C10 - MZ3P05TE6TA005TS05MS – PEÇA COM FISSURAS E PREENCHIMENTO DEFICIENTE.....	81
FIGURA 103 - ENSAIO C11 - MZ3P05TE6TA005TS05MS – PEÇA COM FISSURAS .....	82
FIGURA 104 - COMPARAÇÃO ENTRE O FLUXO DE ENCHIMENTO DA PEÇA COM ZAMAK 5 (À ESQUERDA) E ZAMAK 3 (À DIREITA) .....	84
FIGURA 105 - HIPÓTESE ATUAL COM VELOCIDADE DE INJEÇÃO DE 0,247 M/S AOS 15,2% DE ENCHIMENTO.....	87
FIGURA 106 - PRIMEIRA HIPÓTESE COM VELOCIDADE DE INJEÇÃO DE 0,182 M/S AOS 15,2% DE ENCHIMENTO .....	87
FIGURA 107 - PREENCHIMENTO TOTAL DOS ESCAPES DE GASES DANDO LUGAR A GASES DE INJEÇÃO QUE PODERÃO FICAR RETIDOS NO CENTRO DA PEÇA.....	91
FIGURA 108 - ANÁLISE SWOT DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	92
FIGURA 109 - SENTIDO DA INJEÇÃO .....	97
FIGURA 110 - ENSAIO D1 - MZ3P05TE6TA005TS05MI – PEÇA COM TURBULÊNCIA E RESPECTIVA COMPARAÇÃO COM A PEÇA OBTIDA NO PRIMEIRO ENSAIO COM ZAMAK 3 .....	98
FIGURA 111 - ENSAIO D2 - MZ3P1TE6TA005TS05MI – PEÇA COM MARCAS DE FLUXO, TURBULÊNCIA E UMA FISSURA ASSINALADA .....	99
FIGURA 112 - ENSAIO D3 - MZ3P25TE6TA005TS05MI – PEÇA CHEIA, MAS COM POROSIDADES.....	100
FIGURA 113 - ENSAIO D4 - MZ3P05TE3TA005TS05MI – PEÇA COM PREENCHIMENTO DEFICIENTE E FISSURA CENTRAL. EM BAIXO, COMPARAÇÃO ENTRE O ÂNGULO À ENTRADA DO MATERIAL NA PEÇA OBTIDA NO PRIMEIRO ENSAIO REALIZADO COM ZAMAK 3 .....	100
FIGURA 114 - ENSAIO D5 - MZ3P02TE6TA005TS05MI – PEÇA COM MARCAS DE UNIÃO DE MATERIAL E TURBULÊNCIA NA ZONA DE INJEÇÃO DO MATERIAL.....	101
FIGURA 115 - ENSAIO D6 - MZ3P01TE6TA005TS05MI – PEÇA INCOMPLETA ONDE É POSSÍVEL OBSERVAR AS ZONAS DE UNIÃO DO MATERIAL .....	102
FIGURA 116 - CONFIGURAÇÃO DO FLUXO DO MATERIAL NO ENSAIO DE 15-02-2016, COM ZAMAK 3 E MOLDE SIMPLES (NÃO INVERTIDO) .....	102
FIGURA 117 - ENSAIO D7 - MZ3P01TE4TA005TS05MI – PEÇA INCOMPLETA, MAS COM MAIOR FLUIDEZ .....	103
FIGURA 118 - ENSAIO D8 - MZ3P02TE8TA005TS05MI – PEÇA COM GOTA FRIA NA ZONA ASSINALADA	103
FIGURA 119 - ENSAIO D9 - MZ3P02TE4TA005TS05MI – PEÇA COM MARCAS DE FLUXO .....	104
FIGURA 120 - ENSAIO D10 - MZ3P03TE8TA005TS05MI – PEÇA COM PREENCHIMENTO DEFICIENTE NA LINHA DE JUNÇÃO DO MATERIAL .....	104
FIGURA 121 - DEFEITO COMUM NAS PEÇAS, CAUSADO PELO MÉTODO DE EXTRAÇÃO DAS MESMAS ..	106
FIGURA 123 - CAVIDADE 52,5% CHEIA, COM ESCAPE FRONTAL DE MATERIAL .....	107
FIGURA 122 - CAVIDADE 58,6% CHEIA, COM ESCAPE FRONTAL DE MATERIAL .....	107
FIGURA 124 - ESQUEMA DO ESCAPE FRONTAL CRIADO NA PEÇA .....	107

FIGURA 125 - ENSAIO E1 - MZ3P05TE6MIEF – PEÇA COM EFEITOS DE TURBULÊNCIA NA ZONA DE INJEÇÃO .....	108
FIGURA 126 - ENSAIO E5 - MZ3P02TE6MIEF – PEÇA COM FISSURA CENTRAL E BOLHAS .....	108
FIGURA 127 - ENSAIO E7 - MZ3P02TE4MIEF – PEÇA COM MUITA TURBULÊNCIA NA INJEÇÃO, À DIREITA COM O PORMENOR DA ZONA DE INJEÇÃO .....	109
FIGURA 128 - ENSAIO E8 - MZ3P02TE8MIEF – PEÇA COM LINHAS DE UNIÃO DO MATERIAL E FISSURA CENTRAL.....	109
FIGURA 129 - ENSAIO E9 - MZ3P02TE4MIEF – PEÇA COM FISSURA CENTRAL E LINHAS DE UNIÃO DO MATERIAL.....	110
FIGURA 130 - ENSAIO E10 - MZ3P03TE8MIEF – PEÇA COM PREENCHIMENTO DEFICIENTE, FALHA DE MATERIAL, FISSURA CENTRAL E MARCAS DE FLUXO .....	110
FIGURA 131 - ENSAIO E12 - MZ3P03TE8MIEF – PEÇAS COM NOTÓRIA FORMAÇÃO DA LINHA DE JUNÇÃO DE MATERIAL .....	111
FIGURA 132 - ESQUEMA DE ESCAPES LATERAIS DE MATERIAL A COLOCAR NO MOLDE .....	111
FIGURA 133 - CAVIDADE 52,7% CHEIA, COM ESCAPES FRONTAL E LATERAIS DE MATERIAL.....	112
FIGURA 134 - CAVIDADE 86,1% CHEIA, COM ESCAPES FRONTAL E LATERAIS DE MATERIAL.....	112
FIGURA 135 - ENSAIO F1 - MZ5P15TE4MIEFL – PEÇA COM RECHUPES, MARCAS DE FLUXO E REBARBAS NOS ESCAPES DE MATERIAL .....	113
FIGURA 136 - ENSAIO F2 - MZ5P1TE2MIEFL – PEÇA COM MARCAS DE FLUXO E FALHA DE MATÉRIA NA ZONA DE INJEÇÃO .....	113
FIGURA 137 - ENSAIO F3 - MZ5P15TE4MIEFL – PEÇA COM MUITAS MARCAS DE FLUXO E FRACA QUALIDADE NO ASPETO VISUAL.....	114
FIGURA 138 - ENSAIO F4 - MZ5P15TE2MIEFL – PEÇA COM MARCAS DE FLUXO E PREENCHIMENTO DEFICIENTE NOS PINOS.....	114
FIGURA 139 - PEÇAS INJETADAS COM PRESSÃO ELEVADA .....	115
FIGURA 140 - BICO DE INJEÇÃO CORTADO.....	115
FIGURA 141 - PEÇAS GRANALHADAS DO DIA 30-07-2016, COM ESCAPES LATERAIS DE MATERIAL.....	116
FIGURA 142 - ENSAIO G1 - MZ3PI1TI07PM6TM001MIEFL – PEÇA COM MARCAS DE FLUXO E BOA ACOMODAÇÃO DO MATERIAL EM ALGUNS PONTOS.....	118
FIGURA 143 - ENSAIO G2 - MZ3PI1TI1PM4TM3MIEFL – PEÇA COM REBARBAS, GOTAS FRIAS E MARCAS DE FLUXO .....	118
FIGURA 144 - ENSAIO G6 - MZ3PI1TI1PM2TM2MIEFL – PEÇA COM PREENCHIMENTO DEFICIENTE NOS PINOS E ALGUNS RECHUPES .....	120
FIGURA 145 - ENSAIO G7 - MZ3PI1TI1PM15TM2MIEFL – PEÇA COM MUITA TURBULÊNCIA À ENTRADA DO MATERIAL.....	120
FIGURA 146 - ENSAIO G8 - MZ3PI1TI05PM15TM2MIEFL – PEÇA COM MARCAS ACENTUADAS DE FLUXO DO MATERIAL.....	121
FIGURA 147 - ENSAIO G9 - MZ3PI1TI05PM2TM2MIEFL – PEÇA COM MARCAS DE FLUXO, MAS MELHOR ASPETO VISUAL .....	121
FIGURA 148 - ENSAIO G10 - MZ3PI1TI08PM2TM2MIEFL – PEÇA COM PREENCHIMENTO DEFICIENTE NOS PINOS E ACUMULAÇÃO DE GASES NO CENTRO DA PEÇA.....	122
FIGURA 149 - ENSAIO G11 - MZ3PI15TI08PM2TM2MIEFL – PEÇA COM ASPETO VISUAL MUITO NEGATIVO .....	122

FIGURA 150 - ENSAIO G12 - MZ3PI1TI1PM2TM2MIEFL – PEÇA COM MELHOR ASPETO VISUAL, MAS PREENCHIMENTO DEFICIENTE NOS PINOS .....	123
FIGURA 151 - ENSAIO G13 - MZ3PI1TI2PM2TM1MIEFL – PEÇA MAIS DEFINIDA, MAS COM REBARBA E PREENCHIMENTO DEFICIENTE NOS PINOS .....	123
FIGURA 152 - ENSAIO G14 - MZ3PI1TI2PM15TM1MIEFL – PEÇA COM REBARBAS E PREENCHIMENTO DEFICIENTE.....	124
FIGURA 153 - ENSAIO G15 - MZ3PI1TI2PM3TM1MIEFL – PEÇA COM PREENCHIMENTO DEFICIENTE E ALGUMA REBARBA .....	124
FIGURA 154 - ENSAIO G16 - MZ3PI1TI2PM4TM1MIEFL – PEÇA COM PREENCHIMENTO DEFICIENTE E FALHA DE MATERIAL NO LOCAL DA INJEÇÃO DE METAL.....	125
FIGURA 155 - ENSAIO G17 - MZ3PI1TI2PM3TM2MIEFL – PEÇA COM PREENCHIMENTO DEFICIENTE NOS PINOS E FISSURA CENTRAL .....	125
FIGURA 156 - ENSAIO G18 - MZ3PI1TI2PM4TM2MIEFL – PEÇAS COM REBARBAS NOS ESCAPES DE MATERIAL, PREENCHIMENTO DEFICIENTE NOS PINOS TRASEIROS, MAU ASPETO GERAL E FALHAS DE MATERIAL NA ZONA DE INJEÇÃO DO METAL .....	126
FIGURA 157 - MOLDE COM ESCAPES DE GASES ASSINALADOS .....	128
FIGURA 158 - ENSAIO H1 - MZ3PI1TI4PM1TM2MIEFLEGT438 – PEÇA COM MUITAS MARCAS DE FLUXO E REBARBAS NO ESCAPE DE MATERIAL FRONTAL .....	129
FIGURA 159 - ENSAIO H2 - MZ3PI1TI2PM15TM2MIEFLEGT438 – PEÇA COM PREENCHIMENTO DEFICIENTE NUM PINO TRASEIRO .....	129
FIGURA 160 - ENSAIO H3 - MZ3PI1TI05PM08TM2MIEFLEGT438 – PEÇA COM INDÍCIOS DE FALHA DE MATERIAL NA ZONA DE INJEÇÃO.....	130
FIGURA 161 - ENSAIO H4 - MZ3PI1TI4PM1TM2MIEFLEGT465 – PEÇA MAIS FLUÍDA DEVIDO AO AUMENTO DA TEMPERATURA MAS COM FISSURA CENTRAL E MARCAS DE FLUXO.....	130
FIGURA 162 - ENSAIO H8 - MZ3PI1TI05PM08TM2MIEFLEGT465 – PEÇA COM MARCAS DE FLUXO E ASPETO “PICADO” .....	131
FIGURA 163 - ENSAIO H9 - MZ3PI05TI05PM08TM05MIEFLEGT465 – PEÇA COM FALHA DE MATERIAL NA ZONA DE INJEÇÃO .....	131
FIGURA 164 - ENSAIO H10 - MZ3PI03TI05PM08TM03MIEFLEGT465 – PEÇA COM PREENCHIMENTO DEFICIENTE NOS PINOS E GOTAS FRIAS.....	132
FIGURA 165 - ENSAIO H11 - MZ3PI02TI05PM08TM05MIEFLEGT465 – PEÇA COM MARCAS DE FLUXO, PREENCHIMENTO DEFICIENTE E FISSURA CENTRAL AGRAVADA.....	133
FIGURA 166 - ENSAIO H12 - MZ3PI01TI05PM08TM05MIEFLEGT465 – PEÇA COM MARCAS DE FLUXO E FISSURA CENTRAL .....	133
FIGURA 167 - ENSAIO H13 - MZ3PI01TI05PM03TM05MIEFLEGT465 – PEÇA COM MARCAS DE FLUXO E FALHA DE MATERIAL NA ZONA DE INJEÇÃO, É POSSÍVEL OBSERVAR UM DOS ESCAPES DE GASES.....	134
FIGURA 168 - ENSAIO H14 - MZ3PI02TI05PM03TM05MIEFLEGT465 – PEÇA COM FISSURA NA ZONA DE INJEÇÃO E PREENCHIMENTO DEFICIENTE .....	134
FIGURA 169 - ENSAIO H15 - MZ3PI01TI05PM01TM05MIEFLEGT465 – PEÇA COM ESCAPE DE GASES NOTÓRIO E DIVERSAS FISSURAS .....	135
FIGURA 170 - ENSAIO H16 - MZ3PI05TI05PM01TM05MIEFLEGT465 – PEÇA COM PREENCHIMENTO DEFICIENTE NOS PINOS.....	135

FIGURA 171 - ENSAIO H17 - MZ3PI01TI01PM01TM05MIEFLEGT465 – PEÇA COM PREENCHIMENTO DEFICIENTE.....	136
FIGURA 172 - ENSAIO H18 - MZ3PI01TI01PM01TM03MIEFLEGT465 – PEÇA COM PREENCHIMENTO DEFICIENTE E ONDE É PERCETÍVEL O FLUXO DE ENCHIMENTO.....	137
FIGURA 173 - ENSAIO H19 - MZ3PI02TI01PM03TM05MIEFL – PEÇA COM FRACA QUALIDADE NO ASPETO VISUAL E REBARBA NO ESCAPE DE MATERIAL FRONTAL.....	137
FIGURA 174 - ENSAIO H20 - MZ3PI02TI02PM03TM05MIEFLEGT465 – PEÇA COM AMBOS OS ESCAPES DE GASES VISÍVEIS E COM UMA FISSURA PERPENDICULAR À DIREÇÃO DE INJEÇÃO .....	138
FIGURA 175 - ENSAIO H21 - MZ3PI05TI02PM08TM02MIEFLEGT465 – PEÇA COM UMA FISSURA PARALELA À DIREÇÃO DA INJEÇÃO DO METAL.....	138
FIGURA 176 - ENSAIO H22 - MZ3PI08TI02PM1TM02MIEFLEGT465 – PEÇA COM LIGEIRA PREENCHIMENTO DEFICIENTE NO PINO TRASEIRO ASSINALADO .....	139
FIGURA 177 - ENSAIO H23 - MZ3PI01TI05PM08TM02MIEFLEGT465 – PEÇA COM MARCAS DE FLUXO E PORO JUNTO À ZONA DE INJEÇÃO DO MATERIAL .....	139
FIGURA 178 - ENSAIO I1 - MZ3PI1TI4PM1TM2MINEFLEG – PEÇA COM PREENCHIMENTO DEFICIENTE E DEPRESSÃO NA ZONA DE INJEÇÃO DO METAL (PARTE FRONTAL DA PEÇA) .....	140
FIGURA 179 - ENSAIO I2 - MZ3PI1TI2PM15TM2MINEFLEG – PEÇA COM MARCAS DE FLUXO E GOTA FRIA DESTACADA NA IMAGEM, À DIREITA.....	141
FIGURA 180 - ENSAIO I3 - MZ3PI1TI05PM08TM2MINEFLEG – PEÇA COM EVIDENTE DESNIVELAMENTO NO MOLDE E DEFEITOS COMO GOTAS FRIAS, MARCAS DE JUNÇÃO DO METAL, FISSURAS E PREENCHIMENTO DEFICIENTE .....	141
FIGURA 181 - ENSAIO I7 - MZ3PI1TI05PM1TM05MINEFLEG – PEÇA COM GOTA FRIA JUNTO À LETRA “C” .....	142
FIGURA 182 - ENSAIO I8 - MZ3PI2TI01PM1TM05MINEFLEG – PEÇA COM ESCAPE DE GASES VISÍVEL E DIVERSAS FISSURAS ACENTUADAS .....	143
FIGURA 183 - ENSAIO I9 - MZ3PI6TI02PM3TM05MINEFLEG – PEÇA COM BOM ASPETO VISUAL MAS COM UMA GOTA FRIA E FISSURA CENTRAL.....	143
FIGURA 184 - ENSAIO I10 - MZ3PI6TI1PM3TM05MINEFLEG – PEÇA COM PREENCHIMENTO DEFICIENTE E FISSURA CENTRAL .....	144
FIGURA 185 - ENSAIO I11 - MZ3PI5T1PM3TM05MINEFLEG – PEÇA COM ALGUMAS MARCAS DE FLUXO.....	144
FIGURA 186 - ENSAIO I12 - MZ3PI5TI2PM03TM05MINEFLEG – PEÇA COM BOM ASPETO VISUAL MAS COM MARCAS DE FLUXO PERTO DA ZONA DE INJEÇÃO.....	145
FIGURA 187 - ENSAIO I14 - MZ3PI15TI1PM1TM05MINEFLEG – PEÇA INCOMPLETA E COM DESNIVELAMENTO NO MOLDE, O QUE CAUSA REBARBAS NUM DOS ESCAPES LATERAIS .....	145
FIGURA 188 - ENSAIO I16 - MZ3PI15TI05PM1TM05MINEFLEG – PEÇA COM PREENCHIMENTO DEFICIENTE E JUNTAS FRIAS .....	146
FIGURA 189 - ENSAIO I17 - MZ3PI13TI02PM1TM05MINEFLEG – PEÇA COM MARCAS DE FLUXO, MARCAS DE ARREFECIMENTO E FISSURA CENTRAL A TODO O COMPRIMENTO .....	146
FIGURA 190 - PEÇAS GRANALHADAS - INJETADAS COM OS PARÂMETROS DA ITERAÇÃO I11 .....	148
FIGURA 191 - PEÇAS GRANALHADAS - INJETADAS COM OS PARÂMETROS DA ITERAÇÃO I12 .....	148
FIGURA 192 - PEÇA GRANALHADA E POLIDA MANUALMENTE .....	149
FIGURA 193 - ESQUEMA DO FLUXO DO MATERIAL NA ZONA DA INJEÇÃO DO METAL .....	149

FIGURA 194 - EXEMPLO DE PEÇA COM FALHA DE MATERIAL NA ZONA DE INJEÇÃO, DEVIDO AO FLUXO  
TURBULENTO .....150

FIGURA 195 - RAMPA A REALIZAR PARA QUE AS TENSÕES NO MOMENTO DA INJEÇÃO SEJAM  
REDUZIDAS.....150

## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - NOMES COMERCIAIS DAS PRINCIPAIS LIGAS E RESPECTIVAS NOMENCLATURAS PELA NORMA ASTM B86.....	31
TABELA 2 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO ZAMAK E PERCENTAGEM DE CADA COMPONENTE NA LIGA [53].....	33
TABELA 3 - PERCENTAGEM DE CADA COMPONENTE NA LIGA [43] .....	33
TABELA 4 - PROPRIEDADES FÍSICAS DE ALGUMAS LIGAS DE ZAMAK.....	34
TABELA 5 - PROPRIEDADES FÍSICAS DAS LIGAS DE ZAMAK [53].....	35
TABELA 6 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS LIGAS DE ZAMAK .....	35
TABELA 7 - ENSAIO A1 - MZ5P4TE03TA05TS0MS.....	57
TABELA 8 - ENSAIO A2 - MZ5P05TE02TA05TS0MS.....	57
TABELA 9 - ENSAIO A3 - Z5P1TE01TA05TS0MS .....	58
TABELA 10 - ENSAIO A4 - MZ5P1TE02TA05TS0MS.....	58
TABELA 11 - ENSAIO A5 - MZ5P15TE02TA05TS0MS.....	59
TABELA 12 - ENSAIO A6 - MZ5P2TE02TA05TS0MS.....	59
TABELA 13 - ENSAIO A7 - MZ5P2TE025TA05TS0MS.....	60
TABELA 14 - ENSAIO A8 - MZ5P1TE1TA1TS0MS.....	60
TABELA 15 - ENSAIO A9 - MZ5P15TE02TA05TS0MS.....	61
TABELA 16 - ENSAIO B1 - MZ5P25TE6TA002TS2MS.....	63
TABELA 17 - ENSAIO B2 - MZ5P5TE6TA002TS2MS.....	63
TABELA 18 - ENSAIO B3 - MZ5P1TE6TA002TS2MS.....	64
TABELA 19 - ENSAIO B4 - MZ5P05TE6TA002TS2MS.....	65
TABELA 20 - ENSAIO B5 - MZ5P02TE6TA001TS2MS.....	65
TABELA 21 - ENSAIO B6 - MZ5P03TE6TA001TS2MS.....	66
TABELA 22 - ENSAIO B7 - MZ5P03TE6TA005TS2MS.....	67
TABELA 23 - ENSAIO B8 - MZ5P03TE6TA003TS2MS.....	68
TABELA 24 - ENSAIO B9 - MZ5P03TE10TA001TS2MS.....	68
TABELA 25 - ENSAIO B10 - MZ5P03TE5TA001TS2MS.....	69
TABELA 26 - ENSAIO B11 - MZ5P06TE5TA001TS2MS.....	69
TABELA 27 - ENSAIO B12 - MZ5P04TE5TA001TS2MS.....	70
TABELA 28 - ENSAIO B13 - MZ5P05TE5TA001TS2MS.....	71
TABELA 29 - COMPARAÇÃO ENTRE ZAMAK 3 E ZAMAK 5 .....	75
TABELA 30 - ENSAIO C1 - MZ3P05TE6TA005TS05MS.....	76
TABELA 31 - ENSAIO C3 - MZ3P1TE6TA005TS05MS.....	77
TABELA 32 - ENSAIO C4 - MZ3P25TE6TA005TS05MS.....	77
TABELA 33 - ENSAIO C5 - MZ3P05TE3TA005TS05MS.....	78
TABELA 34 - ENSAIO C6 - MZ3P02TE6TA005TS05MS.....	78
TABELA 35 - ENSAIO C7 - MZ3P01TE6TA005TS05MS.....	79

TABELA 36 - ENSAIO C8 - MZ3P01TE4TA005TS05MS.....	80
TABELA 37 - ENSAIO C9 - MZ3P02TE8TA005TS05MS.....	80
TABELA 38 - ENSAIO C10 - MZ3P02TE4TA8TS05MS.....	81
TABELA 39 - ENSAIO C11 - MZ3P03TE8TA1TS05MS.....	81
TABELA 40 - SIMULAÇÃO EM FLOWCAST - HIPÓTESE 1 .....	83
TABELA 41 - SIMULAÇÃO EM FLOWCAST - HIPÓTESE 2 .....	84
TABELA 42 - SIMULAÇÃO EM FLOWCAST - HIPÓTESE 3 .....	86
TABELA 43 - SIMULAÇÃO EM FLOWCAST - HIPÓTESE 4 .....	88
TABELA 44 - SIMULAÇÃO EM FLOWCAST – HIPÓTESE 5 .....	89
TABELA 45 - SIMULAÇÃO EM FLOWCAST - HIPÓTESE 6 .....	90
TABELA 46 - SIMULAÇÃO EM FLOWCAST - HIPÓTESE 7 .....	91
TABELA 47 - SIMULAÇÃO EM FLOWCAST - HIPÓTESE 8 .....	94
TABELA 48 - SIMULAÇÃO EM FLOWCAST - HIPÓTESE 9 .....	95
TABELA 49 - SIMULAÇÃO EM FLOWCAST - HIPÓTESE 10 .....	96
TABELA 50 - ENSAIO D1 - MZ3P05TE6TA005TS05MI .....	98
TABELA 51 - ENSAIO D2 - MZ3P1TE6TA005TS05MI .....	99
TABELA 52 - ENSAIO D3 - MZ3P25TE6TA005TS05MI .....	99
TABELA 53 - ENSAIO D4 - MZ3P05TE3TA005TS05MI .....	100
TABELA 54 - ENSAIO D5 - MZ3P02TE6TA005TS05MI .....	101
TABELA 55 - ENSAIO D6 - MZ3P01TE6TA005TS05MI .....	101
TABELA 56 - ENSAIO D7 - MZ3P01TE4TA005TS05MI .....	102
TABELA 57 - ENSAIO D8 - MZ3P02TE8TA005TS05MI .....	103
TABELA 58 - ENSAIO D9 - MZ3P02TE4TA005TS05MI .....	104
TABELA 59 - ENSAIO D10 - MZ3P03TE8TA005TS05MI .....	104
TABELA 60 - MATRIZ DE RESULTADOS COMUNS ENTRE ENSAIOS COM ZAMAK 5 E ZAMAK 3 .....	105
TABELA 61 - ENSAIO E1 - MZ3P05TE6MIEF .....	108
TABELA 62 - ENSAIO E5 - MZ3P02TE6MIEF .....	108
TABELA 63 - ENSAIO E7 - MZ3P02TE4MIEF .....	109
TABELA 64 - ENSAIO E8 - MZ3P02TE8MIEF .....	109
TABELA 65 - ENSAIO E9 - MZ3P02TE4MIEF .....	110
TABELA 66 - ENSAIO E10 - MZ3P03TE8MIEF .....	110
TABELA 67 - ENSAIO E12 - MZ3P05TE8MIEF .....	111
TABELA 68 - ENSAIO F1 - MZ5P15TE4MIEFL.....	112
TABELA 69 - ENSAIO F2 - MZ5P1TE2MIEFL.....	113
TABELA 70 - ENSAIO F3 - MZ5P15TE4MIEFL.....	113
TABELA 71 - ENSAIO F4 - MZ5P15TE2MIEFL.....	114
TABELA 72 - ENSAIO G1 - MZ3PI1TI07PM6TM001MIEFL .....	117
TABELA 73 - ENSAIO G2 - MZ3PI1TI1PM4TM3MIEFL .....	118
TABELA 74 - ENSAIO G3 - MZ3PI05TI2PM1TM2MIEFL .....	119
TABELA 75 - ENSAIO G4 - MZ3PI01TI4PM1TM2MIEFL .....	119
TABELA 76 - ENSAIO G5 - MZ3PI05TI4PM1TM2MIEFL .....	119
TABELA 77 - ENSAIO G6 - MZ3PI1TI1PM2TM2MIEFL .....	119
TABELA 78 - ENSAIO G7 - MZ3PI1TI1PM15TM2MIEFL .....	120

TABELA 79 - ENSAIO G8 - MZ3PI1TI05PM15TM2MIEFL .....	120
TABELA 80 - ENSAIO G9 - MZ3PI1TI05PM2TM2MIEFL .....	121
TABELA 81 - ENSAIO G10 - MZ3PI1TI08PM2TM2MIEFL .....	121
TABELA 82 - ENSAIO G11 - MZ3PI15TI08PM2TM2MIEFL .....	122
TABELA 83 - ENSAIO G12 - MZ3PI1TI1PM2TM2MIEFL .....	123
TABELA 84 - ENSAIO G13 - MZ3PI1TI2PM2TM1MIEFL .....	123
TABELA 85 - ENSAIO G14 - MZ3PI1TI2PM15TM1MIEFL .....	124
TABELA 86 - ENSAIO G15 - MZ3PI1TI2PM3TM1MIEFL .....	124
TABELA 87 - ENSAIO G16 - MZ3PI1TI2PM4TM1MIEFL .....	125
TABELA 88 - ENSAIO G17 - MZ3PI1TI2PM3TM2MIEFL .....	125
TABELA 89 - ENSAIO G18 - MZ3PI1TI2PM4TM2MIEFL .....	126
TABELA 90 - MATRIZ DE RESULTADOS APÓS ALTERAÇÕES DE PARÂMETROS NA MÁQUINA .....	127
TABELA 91 - ENSAIO H1 - MZ3PI1TI4PM1TM2MIEFLEGT438 .....	128
TABELA 92 - ENSAIO H2 - MZ3PI1TI2PM15TM2MIEFLEGT438 .....	129
TABELA 93 - ENSAIO H3 - MZ3PI1TI05PM08TM2MIEFLEGT438 .....	129
TABELA 94 - ENSAIO H4 - MZ3PI1TI4PM1TM2MIEFLEGT465 .....	130
TABELA 95 - ENSAIO H8 - MZ3PI1TI05PM08TM2MIEFLEGT465 .....	130
TABELA 96 - ENSAIO H9 - MZ3PI05TI05PM08TM05MIEFLEGT465 .....	131
TABELA 97 - ENSAIO H10 - MZ3PI03TI05PM08TM03MIEFLEGT465 .....	132
TABELA 98 - ENSAIO H11 - MZ3PI02TI05PM08TM05MIEFLEGT465 .....	132
TABELA 99 - ENSAIO H12 - MZ3PI01TI05PM08TM05MIEFLEGT465 .....	133
TABELA 100 - ENSAIO H13 - MZ3PI01TI05PM03TM05MIEFLEGT465 .....	133
TABELA 101 - ENSAIO H14 - MZ3PI02TI05PM03TM05MIEFLEGT465 .....	134
TABELA 102 - ENSAIO H15 - MZ3PI01TI05PM01TM05MIEFLEGT465 .....	135
TABELA 103 - ENSAIO H16 - MZ3PI05TI05PM01TM05MIEFLEGT465 .....	135
TABELA 104 - ENSAIO H17 - MZ3PI01TI01PM01TM05MIEFLEGT465 .....	136
TABELA 105 - ENSAIO H18 - MZ3PI01TI01PM01TM03MIEFLEGT465 .....	136
TABELA 106 - ENSAIO H19 - MZ3PI02TI01PM03TM05MIEFL .....	137
TABELA 107 - ENSAIO H20 - MZ3PI02TI02PM03TM05MIEFLEGT465 .....	137
TABELA 108 - ENSAIO H21 - MZ3PI05TI02PM08TM02MIEFLEGT465 .....	138
TABELA 109 - ENSAIO H22 - MZ3PI08TI02PM1TM02MIEFLEGT465 .....	138
TABELA 110 - ENSAIO H23 - MZ3PI01TI05PM08TM02MIEFLEGT465 .....	139
TABELA 111 - ENSAIO I1 - MZ3PI1TI4PM1TM2MINEFLEG .....	140
TABELA 112 - ENSAIO I2 - MZ3PI1TI2PM15TM2MINEFLEG .....	140
TABELA 113 - ENSAIO I3 - MZ3PI1TI05PM08TM2MINEFLEG .....	141
TABELA 114 - ENSAIO I7 - MZ3PI1TI05PM1TM05MINEFLEG .....	142
TABELA 115 - ENSAIO I8 - MZ3PI2TI01PM1TM05MINEFLEG .....	142
TABELA 116 - ENSAIO I9 - MZ3PI6TI02PM3TM05MINEFLEG .....	143
TABELA 117 - ENSAIO I10 - MZ3PI6TI1PM3TM05MINEFLEG .....	143
TABELA 118 - ENSAIO I11 - MZ3PI5T1PM3TM05MINEFLEG .....	144
TABELA 119 - ENSAIO I12 - MZ3PI5TI2PM03TM05MINEFLEG .....	144
TABELA 120 - ENSAIO I14 - MZ3PI15TI1PM1TM05MINEFLEG .....	145
TABELA 121 - ENSAIO I16 - MZ3PI15TI05PM1TM05MINEFLEG .....	146



---

TABELA 122 - ENSAIO I17 - MZ3PI13TI02PM1TM05MINEFLEG .....	146
TABELA 123 - MATRIZ DE RESULTADOS DO LOTE DE ENSAIOS COM MOLDE NITRURADO.....	147

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>2</b>
<b>1.1</b>	<b>Enquadramento.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3</b>	<b>Metodologia .....</b>	<b>3</b>
<b>1.4</b>	<b>Estrutura.....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>6</b>
<b>2.1</b>	<b>A Fundição.....</b>	<b>6</b>
2.1.1	Conceito de Processo de Fundição	6
2.1.2	Tipos de fundição	7
2.1.3	Tipos de moldação para fundição	8
<b>2.2</b>	<b>Fundição Injetada .....</b>	<b>19</b>
2.2.1	Injeção em câmara fria	20
2.2.2	Injeção em câmara quente	23
2.2.3	Defeitos de fundição injetada	25
<b>2.3</b>	<b>O Zamak .....</b>	<b>30</b>
2.3.1	Composição química típica	31
2.3.2	Propriedades físicas e mecânicas	33
2.3.3	Aplicações	36
<b>2.4</b>	<b>Simulação aplicada à fundição.....</b>	<b>37</b>
2.4.1	Interesse da simulação	37
2.4.2	Ferramentas informáticas disponíveis no mercado	37
2.4.3	SolidCast™	40

<b>3</b>	<b>TRABALHO PRÁTICO</b>	<b>50</b>
<b>3.1</b>	<b>Caracterização da empresa</b>	<b>48</b>
<b>3.2</b>	<b>Caracterização do problema</b>	<b>49</b>
3.2.1	Geometria da peça	54
3.2.2	Metal injetado	55
3.2.3	Problemas sentidos	55
<b>3.3</b>	<b>Definição da estratégia de abordagem e resultados obtidos</b>	<b>55</b>
3.3.1	Variação dos parâmetros	56
3.3.2	Variação dos parâmetros e controlo de temperatura do molde	62
3.3.3	Teste bomba de Zamak	73
3.3.4	Substituição do metal utilizado	74
3.3.5	Simulação de novas condições: Alteração do material para Zamak 3	76
3.3.6	Simulações SolidCast™	82
<b>3.4</b>	<b>Análise SWOT dos resultados obtidos</b>	<b>92</b>
<b>3.5</b>	<b>Implementação de melhorias</b>	<b>97</b>
3.5.1	Inversão do molde	97
<b>3.6</b>	<b>Análise dos resultados obtidos e considerações a tomar para futuros ensaios</b>	<b>105</b>
3.6.1	Escape de material frontal	106
3.6.2	Escapes laterais de material	111
3.6.3	Alteração da programação da ZM3 e troca da bomba de injeção	117
3.6.4	Escape de gases	127
3.6.5	Molde niturado	140
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>152</b>
<b>4.1</b>	<b>Preâmbulo</b>	<b>152</b>
<b>4.2</b>	<b>Resultados finais</b>	<b>155</b>
<b>4.3</b>	<b>Sugestão de trabalhos futuros</b>	<b>154</b>
<b>5</b>	<b>BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO</b>	<b>158</b>
<b>6</b>	<b>ANEXOS</b>	<b>165</b>
<b>6.1</b>	<b>ANEXO 1</b>	<b>165</b>
<b>6.2</b>	<b>ANEXO 2</b>	<b>165</b>

# INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

1.2 OBJETIVOS

1.3 METODOLOGIA

1.4 ESTRUTURA

# 1 INTRODUÇÃO

No âmbito da Unidade Curricular de Dissertação/Projeto/Estágio, inserida no Mestrado em Engenharia Mecânica – Materiais e Tecnologias de Fabrico, foi desenvolvido um projeto de otimização das condições de injeção de peças em liga Zamak com funções meramente estéticas. Este projeto foi realizado com o apoio da empresa PR Metal, Lda. a qual acedeu à realização de diversos ensaios que constituíram a base de estudo deste trabalho, o qual teve como objetivo principal a obtenção de peças sem defeitos internos, de enchimento ou superficiais. Para isso, foi realizado um estudo sobre o tema da fundição injetada, o qual levou à otimização empírica das condições de injeção, realização de simulações numéricas, e até à implementação de mudanças no molde, até se chegar ao objetivo pretendido.

## 1.1 Enquadramento

O aumento da utilização das várias ligas de Zamak para diversos fins tem vindo a registar um crescimento sustentado ao longo do tempo. Ao falar-se em injeção Zamak, a primeira ideia que se tem é a de grandes máquinas de fundição injetada, a trabalhar com pressões elevadas para injetar peças fundidas de grandes dimensões. No entanto, este conceito tem vindo a mudar, pelo facto de se estarem a abrir novos mercados para a injeção de Zamak. Estes mercados passam por peças de maior rigor dimensional, normalmente mais pequenas e que, contrariamente ao que é conhecido, envolvendo outro tipo de cuidados e métodos para o seu fabrico.

Este trabalho, inserido numa empresa de construção de máquinas e de injeção em Zamak, teve como fundamento a necessidade de injeção de peças da *Cavalinho*® com elevado nível de qualidade quanto à sua aparência estética. Numa altura em que a PR-Metal pretende apostar num mercado diferente, de injeção Zamak em peças estéticas, torna-se importante perceber de que forma o comportamento do material e o método de injeção influenciam o resultado final, de forma a efetuar uma abordagem no sentido da obtenção de peças isentas de defeitos e com um adequado controlo do processo.

## 1.2 Objetivos

O objetivo principal que aqui se apresenta, tal como já fora referido, é a obtenção de peças estéticas sem defeitos aparentes, de uma forma viável/sustentável para a empresa. Isto porque a peça em questão possui uma função estética e os seus elevados critérios de qualidade não permitem qualquer tipo de defeito na sua superfície. Outro aspeto importante será o estudo do fluxo do material e da fundição injetada, para perceber o comportamento do material ao ser submetido ao método de fabrico em questão.

## 1.3 Metodologia

Com vista a dar resposta aos objetivos traçados acima, optou-se por adotar uma determinada metodologia de trabalho. A qual passou por:

- Análise da situação inicial e compreensão dos objetivos a atingir;
- Estudo bibliográfico acerca da Fundição em moldes não permanentes e em moldes permanentes;
- Estudo acerca da Fundição Injetada;
- Estudo das ligas em uso – Zamak;
- Pequena abordagem a ferramentas de simulação de fundição injetada;
- Apresentação da empresa PR-Metal,Lda.;
- Caracterização do problema e seu ponto de situação;
- Elaboração da estratégia para a evolução do projeto;
- Análise das ferramentas utilizadas no fabrico das peças;
- Realização de ensaios preliminares;
- Diagrama de *Ishikawa* do problema;
- Definição de linhas orientativas a seguir;
- Variação de parâmetros de injeção de forma a ir ao encontro do resultado pretendido, utilizando o método empírico;
- Simulações de injeção em *SolidCast™*;
- Substituição do metal utilizado;

- Realização de ensaios no terreno tendo em conta as alterações entretanto realizadas;
- Simulação de novas condições;
- Alterações de molde;
- Realização de ensaios;
- Análise SWOT dos resultados obtidos;
- Realização de alterações na máquina de injeção;
- Realização de novos ensaios;
- Matriz de resultados;
- Conclusões;
- Sugestões para trabalhos futuros.

## 1.4 Estrutura

O presente documento está dividido em cinco partes essenciais: Introdução, Revisão Bibliográfica, Trabalho Prático, Conclusões e Trabalhos Futuros. Em cada capítulo é possível observar subcapítulos que descrevem em pormenor os assuntos a abordar em cada um deles.

Inicialmente, a Introdução, tal como o nome indica, pretende introduzir o leitor no caso que irá ser abordado. No capítulo da Revisão Bibliográfica, serão explicitados alguns conceitos teóricos essenciais, onde se pretende enquadrar o leitor com os temas envolvidos nesta dissertação, para uma melhor compreensão de todo o trabalho. Posteriormente, no capítulo do Trabalho Prático, é descrito todo o trabalho realizado, desde a abordagem inicial ao mesmo, passando por todas as etapas percorridas e método de abordagem utilizado, até chegar ao resultado final. No capítulo das Conclusões são reforçadas todas as ilações que se podem retirar do projeto realizado, com enfoque nas consequências das ações tomadas. Por fim, o capítulo de Trabalhos Futuros permite o registo de alguns pontos que podem sofrer melhorias ou aprofundamento no estudo, de modo a agilizar a obtenção da peça final pretendida.

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A FUNDIÇÃO

2.2 FUNDIÇÃO INJETADA

2.3 O ZAMAK

2.4 SIMULAÇÃO APLICADA À FUNDIÇÃO



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 A Fundição

A fundição injetada é o processo de fabrico utilizado ao longo de todo o trabalho, pelo que se torna interessante abordar o tema da fundição, permitindo desta forma uma melhor compreensão acerca do mesmo.

#### 2.1.1 Conceito de Processo de Fundição

A fundição consiste essencialmente na fusão de um metal ou liga metálica, que posteriormente é vazado para o interior de uma ou mais cavidades de uma moldação, (ver Figura 1), que darão a forma pretendida à peça final [1].



Figura 1 - Vazamento de metal fundido para uma moldação [2]

No caso das peças obtidas não se encontrarem na sua forma definitiva, estas poderão ser sujeitas a um outro processo à *posteriori*, por exemplo, através de corte, furação, torneamento, fresagem, rebarbagem, polimento, entre outros. No caso da forma obtida já ser a desejada, a peça poderá ainda assim ser sujeita a um tratamento térmico, levar um revestimento na sua superfície ou até sofrer outro processo de transformação, como é exemplo a maquinagem [3-4].

O molde consiste num conjunto de elementos utilizados para dar a forma pretendida às cavidades (moldações) que irão receber o metal fundido, sendo que estas, após a solidificação, darão origem às apelidadas peças fundidas.

De forma a proporcionar uma idealização mais concreta, é relevante referir que, na maior parte dos casos, as cavidades localizam-se no interior das moldações dos moldes. Estas são, por si só, constituídas por duas ou mais meias-moldações nas quais se criam canais de distribuição (jitos) de forma a que, ao vazar o metal fundido, este seja direcionado para as cavidades, como se pode verificar na Figura 2.

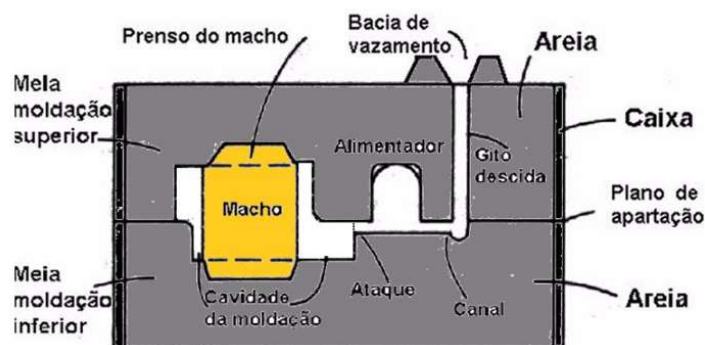


Figura 2 - Descrição dos elementos essenciais de uma moldação [3]

Apesar deste ser o conceito básico do processo de fundição, existem diversos métodos de fundição. Alguns deles serão agora descritos de uma forma sucinta, dando ênfase ao processo de fundição injetada, que é o processo em causa nesta dissertação.

### 2.1.2 Tipos de fundição

Os tipos de fundição existentes diferem essencialmente no tipo de moldação: permanente ou não permanente. O processo de fundição começou por ser realizado em moldações não permanentes como a moldação em Areia Verde ou Areia Auto-secativa, para moldações de grande porte [4].

Dentro das moldações permanentes existem, por exemplo, os moldes de fundição injetada, fundição por centrifugação, fundição por gravidade e fundição de baixa pressão.

### 2.1.3 Tipos de moldação para fundição

#### 2.1.3.1 *Moldações não permanentes*

##### Moldes em areia verde

Sendo o processo mais simples e genericamente falado nos processos de fundição (bem como o de mais baixo custo), torna-se importante ter algumas noções básicas sobre o mesmo. Assim, este tipo de moldação deve preencher determinados requisitos para o seu uso, entre eles [5, 6]:

- Resistência suficiente para suportar a pressão do metal líquido que será vazado para o seu interior;
- Resistência à ação erosiva do metal que se escoar rapidamente pelos canais de alimentação, e pela cavidade da moldação;
- Permeabilidade suficiente para que os gases gerados possam sair durante o vazamento do metal. Isto é importante para evitar a criação de poros por acumulação de ar ou gases durante o preenchimento da cavidade e correspondente solidificação;
- Refratariedade que permita suportar as altas temperaturas de fusão dos metais;
- Suportar a inclusão de “machos”, para produzir cavidades pré-programadas nas peças, quando necessário;
- Contemplar a possibilidade de contração da peça, que acontece durante a solidificação do metal.

Para realização do processo em areia verde, é necessário utilizar uma moldação com a forma desejada, feita com base numa mistura de grãos de sílica, água e ligantes químicos. É vazado um metal líquido para a cavidade e, após este passo, retira-se esse molde, e obtém-se uma moldação com a cavidade pretendida. Se for necessário, realizam-se os machos em areia para formar os vazios, furos ou reentrâncias das peças, e estes são colocados no molde antes deste ser fechado.

Por norma, a moldação é contruída em duas partes, moldação superior e moldação inferior (Figura 3) [5].

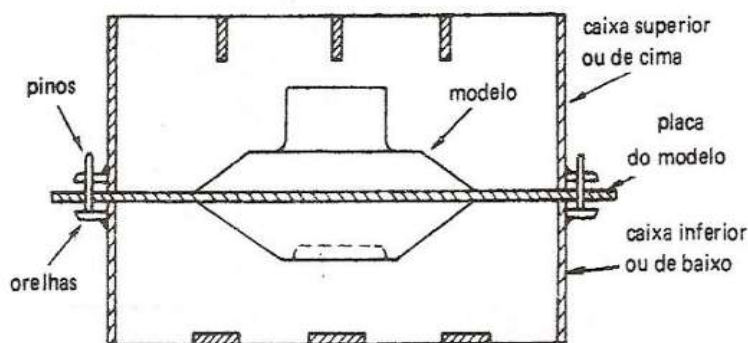


Figura 3 - Constituição de uma moldação em areia verde [6]

Através da Figura 4, apresentada de seguida, encontram-se representados os elementos necessários para o processo de fundição de uma moldação em areia verde.

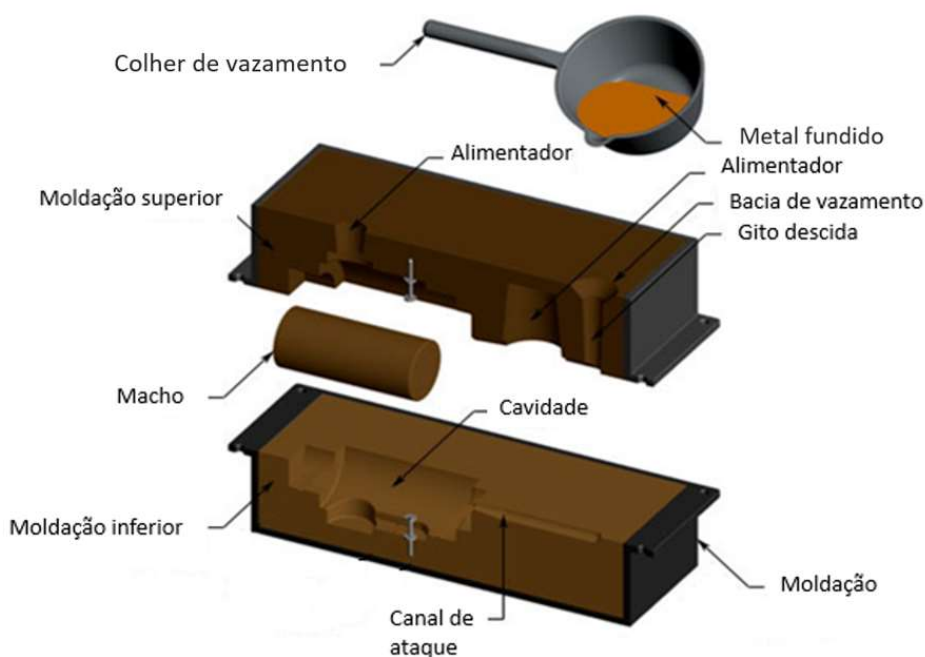


Figura 4 - Colher de vazamento e elementos constituintes de uma moldação não-permanente para fundição em areia verde [7]

Após efetuar a montagem da moldação superior com a moldação inferior, devidamente alinhadas e com esse alinhamento garantido durante o processo de vazamento, poderá então vazar-se o metal líquido para o interior da moldação. O metal deverá preencher

todo o espaço livre existente no interior da moldação em areia, tal como se poderá constatar pela Figura 5.

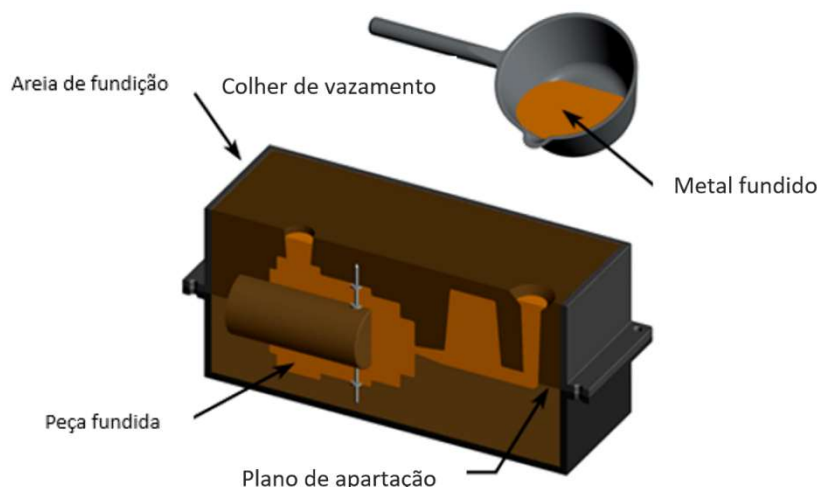


Figura 5 - Preenchimento do espaço livre no molde pelo metal fundido [7]

Vazado todo o metal líquido para o interior da moldação, é necessário deixá-lo arrefecer de forma a que este solidifique. Após a sua solidificação, deve proceder-se ao abate das moldações, para que seja possível retirar a peça produzida, e separá-la dos seus canais de alimentação e sistema de gitagem (Figura 6) [6,4].

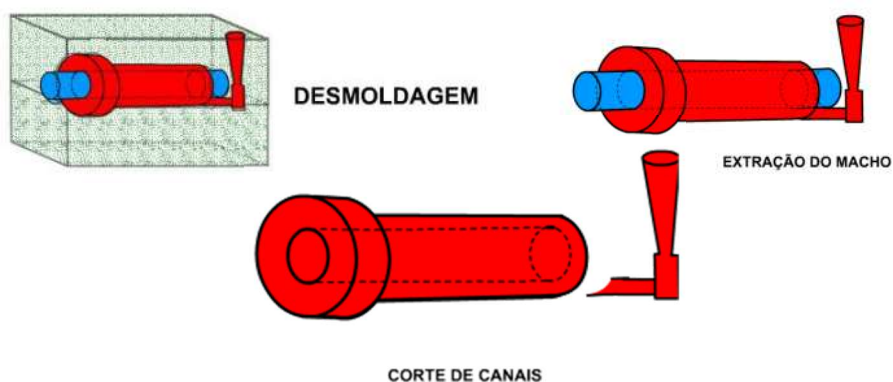


Figura 6 - Sequência de desmoldagem, extração do macho e corte de canais de alimentação [6]

De seguida, a peça poderá passar por um processo de acabamento de forma a dispor de um melhor aspeto superficial, eliminando desta forma as marcas do sistema de gitagem e plano de apartação, bem como alguns defeitos que possam ter sido causados pela areia da moldação (inclusões, contaminações, etc.) [4].

No final, obtém-se a peça fundida, pronta (Figura 7).

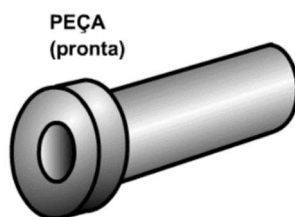


Figura 7 - Peça fundida final [6]

### Fundição de precisão por cera perdida

Um dos principais processos de fundição que utilizam moldação não permanente é a Fundição de precisão por cera perdida, também conhecido por “*Investment Casting*”. Este processo de fundição possibilita a produção de peças com forma complexa e com ótima qualidade superficial e dimensional, apresentando uma baixa rugosidade superficial e tolerâncias dimensionais apertadas.

Qualitativamente, as peças produzidas por este processo são consideradas muito melhores que as peças obtidas através de outros processos tradicionais de moldação não permanente. De referir que através deste processo é também possível produzir peças de parede fina em qualquer liga fundida, como por exemplo, superligas e aços refratários [8-9]. Através da imagem seguinte (Figura 8), representam-se as diferentes fases do processo de moldação de precisão por cera perdida.

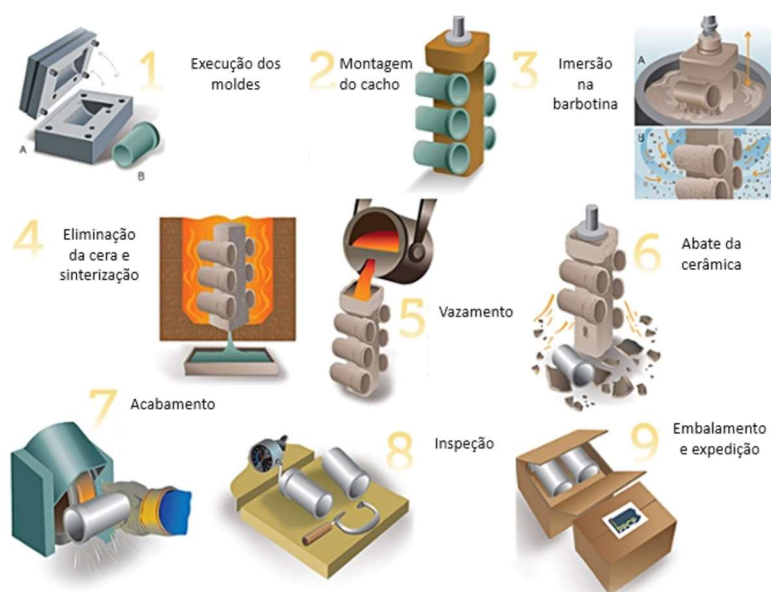


Figura 8 - Sequência do processo de fundição por cera perdida [10]

Assim, o processo de moldação de precisão por cera perdida tem diversas fases, as quais se apresentam de seguida [3, 8-9]:

- Execução de moldes – Produção de moldes de acordo com as necessidades e especificações do cliente, de forma a possibilitar a injeção de cera, produzindo assim os protótipos pretendidos pelo cliente;
- Montagem dos cachos, a qual segue um *layout* previamente definido;
- Imersão em barbotinas, onde se encontram ligantes que funcionam como agentes de gelificação, e pós refratários, nas quantidades ótimas. Como ligantes pode-se ter a sílica coloidal ou o tetrasilicato de etilo, apresentando diferentes tempos de secagem;
- Eliminação da cera do interior das moldações, a qual é realizada em fornos de atmosfera oxidante ou em autoclaves de vapor. De forma a permitir o escoamento total da cera, é necessário colocar a cabeça de vazamento voltada para baixo. É relevante ter em mente que a cera derretida usualmente é recuperada e reutilizada no fabrico dos jitos;
- Vazamento do metal fundido;
- Abate das moldações - normalmente feita através de intensas vibrações produzidas por um martelo pneumático montado no interior de uma cabina insonorizada;
- Acabamento - Atendendo às exigências de qualidade do cliente, as peças produzidas poderão ter de passar por operações de acabamento, como por exemplo, a granalhagem;
- Inspeção – Após as peças terem passado pela fase de acabamento, é necessário inspecionar as peças produzidas (visualmente ou através de ensaios não destrutivos amostrais);
- Embalamento e expedição.

Uma característica específica destes processos é o facto das moldações não originarem linha de apartação nas peças produzidas. O problema da apartação coloca-se ao nível da execução das moldações das peças, onde vai aparecer a linha de apartação [3].

## Moldação em gesso

A fundição com moldação em gesso é usualmente utilizada para a produção de pequenas séries de peças fundidas em ligas não ferrosas, com secção fina e complexa, tendo como requisito a elevada qualidade superficial e precisão dimensional.

A principal razão de não se poder produzir ligas ferrosas através deste processo, prende-se com o facto dessas ligas reagirem com o gesso [11-12].

A sequência de operações do processo está esquematicamente representada na Figura 8.

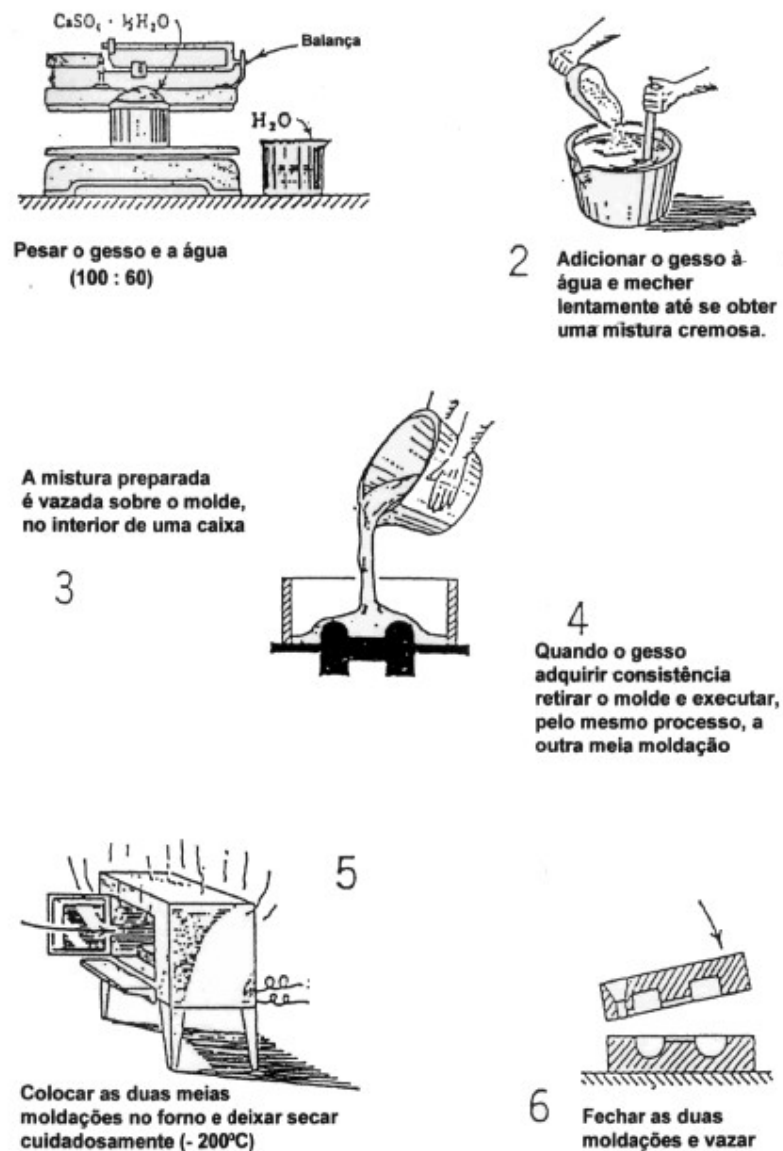


Figura 8 - Fases do processo de fundição em gesso [3]



### 2.1.3.2 *Moldações permanentes*

As moldações permanentes para fundição, ao contrário das moldações anteriores, consistem em moldes metálicos que, pelo seu material, trazem vantagens ao nível da durabilidade do molde. Desta forma, não é necessário produzir um novo molde a cada peça que se pretende fundir.

No caso das moldações permanentes, são os moldes que dão diretamente origem à peça sem necessidade das moldações, algo que no caso anterior seria o molde que daria origem às moldações, que por sua vez dariam origem à peça pretendida [13-16].

O princípio de funcionamento destes moldes passa por [3-17]:

- Fechar o molde (antes, colocar o macho se necessário);
- Vazar o metal fundido;
- Arrefecimento - o metal vazado deverá arrefecer e solidificar no molde;
- Abrir o molde;
- Retirar a peça final (sem necessidade de destruir a moldação).

### Fundição por gravidade

Neste tipo de fundição, utilizam-se moldes constituídos por aço ou ferro fundido, os quais são indicados para o vazamento de metais com baixo ponto de fusão, tais como ligas de alumínio, ligas de magnésio ou ligas de cobre [3, 18-19].

De realçar, é que a pressão utilizada para o enchimento durante o processo resulta do peso do metal vazado e da altura do vazamento do metal líquido [3, 18-19].

### Fundição por baixa pressão

Neste caso, ao contrário do que se passa na fundição por gravidade, o vazamento é feito de baixo para cima, usando uma pressão na ordem dos 0,1 MPa.

A principal vantagem deste processo é o facto de o metal vazado não se encontrar em contacto com o ar durante o processo de enchimento, não havendo assim a possibilidade de se dar a oxidação do mesmo. Na Figura 9, encontra-se representado o processo de fundição por baixa pressão, o qual se passa a descrever [3].

Assim, primeiramente, coloca-se um molde metálico por cima do forno contendo o metal líquido. De seguida, inicia-se a insuflação de ar comprimido para o interior do forno, o que irá fazer com que o metal líquido suba, com baixa turbulência, em direcção à cavidade da moldação. Após o enchimento da cavidade, tem-se uma pressão de manutenção que irá atuar até se verificar a completa solidificação da peça. Por fim, dá-se a despressurização do forno, o que provocará a descida do metal líquido de volta ao forno [3, 20-22]. É possível visualizar o fluxo descrito através da Figura 9, abaixo.

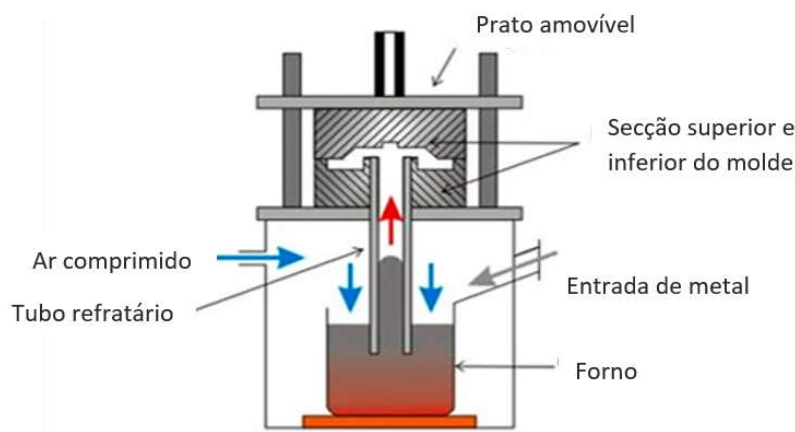


Figura 9 - Fluxo de enchimento por baixa pressão [23]

### Fundição injetada

O princípio da fundição injetada passa por, através de equipamentos de injeção (bombas apropriadas), forçar o enchimento do metal no molde. Este enchimento pode ser efetuado através de máquinas de câmara quente ou de câmara fria, sendo que no primeiro caso o sistema de injeção se encontra mergulhado no metal líquido, e no segundo caso a fundição do metal é feita exteriormente a este processo de injeção. Uma vez que este é o processo utilizado neste trabalho, este será abordado com mais pormenor no capítulo 2.2.

## Fundição centrífuga

Aqui, a configuração das peças é dada através da força centrífuga causada pela rotação do molde em torno do seu eixo. Este procedimento fará com que o metal líquido seja projetado contra as paredes das cavidades do molde, assegurando que a solidificação vá ocorrendo das paredes do molde em direção ao eixo de rotação do mesmo. Desta forma, as peças irão obter a forma final desejada [3, 24].

Dentro da fundição centrífuga, destacam-se três tipos:

- Fundição por centrifugação pura – Onde o eixo da peça coincide com o eixo do molde e em que o diâmetro da cavidade corresponde ao diâmetro da peça a obter após este processo de fundição. Neste caso, a quantidade de metal vazado terá um papel preponderante, uma vez que irá definir a espessura com que as peças ficarão. Nas imagens abaixo, encontram-se representadas a centrifugação pura horizontal (Figura 10) e a centrifugação pura vertical (Figura 11).

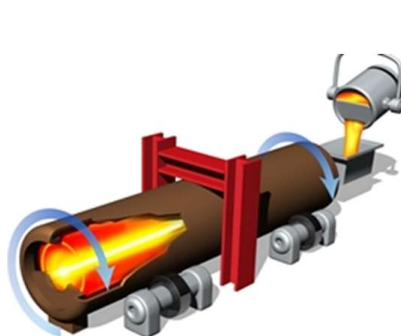


Figura 10 - Centrifugação pura horizontal [25]

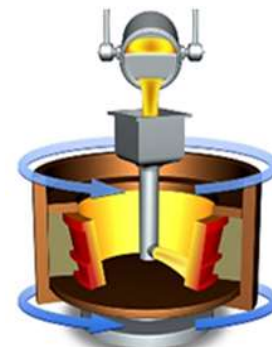


Figura 11 - Centrifugação pura vertical [26]

- Fundição por semi-centrifugação – Tal como acontece na centrifugação pura, o eixo da peça coincide com o eixo do molde, no entanto, as peças obtidas por este tipo de centrifugação são obtidas através de machos, como se pode observar na Figura 10. De referir que, este tipo de centrifugação, permite produzir peças simétricas [26].

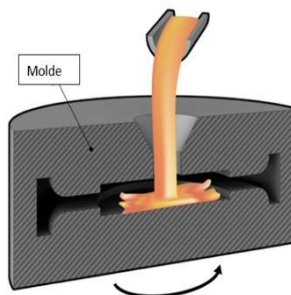


Figura 10 - Exemplo de molde de fundição por semi-centrifugação [27]

- “*Centrifuging*” ou “*Centrifuge*” – Neste tipo de fundição, o eixo de rotação do molde não coincide com o eixo das peças. Ou seja, o metal é vazado para um jito central através da bacia de vazamento que, por ação da força centrífuga, irá preencher as cavidades correspondentes às peças localizadas na periferia do eixo de rotação da moldação, tal como se poderá constatar através da Figura 11 [26, 28-29].

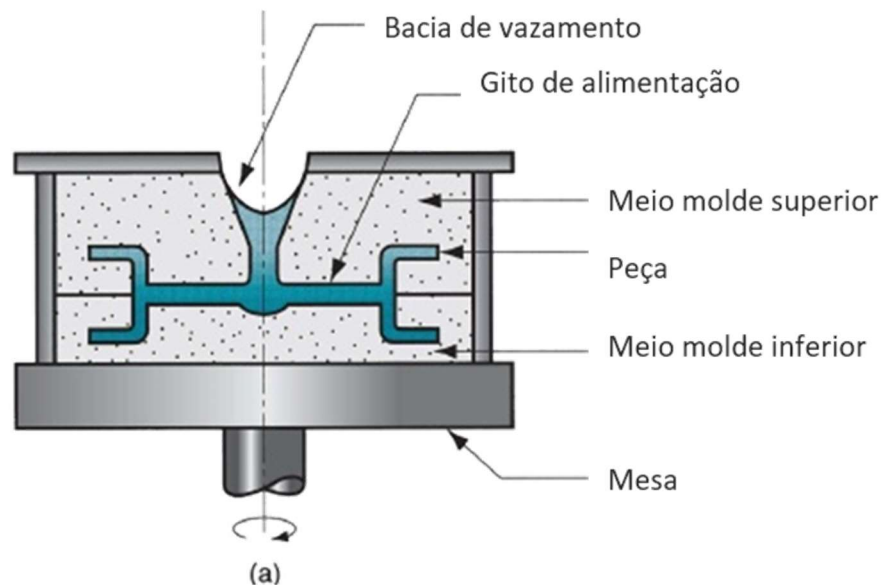


Figura 11 - Exemplo de funcionamento do processo de fundição por centrifugação [3]

#### 2.1.3.3 Tipos de moldes

Em fundição, torna-se fundamental dispor de moldes que cumpram certos e determinados parâmetros, como por exemplo:

- Suportarem as temperaturas do metal vazado;
- Não reagirem quimicamente com o metal líquido;
- Não se fundirem com o metal vazado.

Desta forma, e mediante o material do molde, este poderá ser classificado como:

- Moldes não permanentes – constituídos a partir de areia de sílica, por exemplo, ou outro tipo de areia, usando os ligantes adequados (ver Figura 12). Estes moldes são utilizados em processos de fundição como os referidos no subcapítulo 2.1.3.2..

Este tipo de moldes (moldações) proporcionam a produção de peças com um acabamento e precisão dimensional razoável, quando comparado com os processos em moldes permanentes. De referir que, após a solidificação da peça, torna-se necessário destruir a moldação de forma a retirar a peça, permitindo assim uma única moldação. No entanto, se a moldação for efetuada em areia, esta poderá ser parcialmente reutilizada.

Estas moldações são mais indicadas para processos de fundição de ligas ferrosas (ligas Fe-C), devido ao seu elevado ponto de fusão.

Na Figura 12, abaixo, encontra-se um exemplo de uma moldação em areia.



Figura 12 - Exemplo de moldação em areia [30]

- Moldes permanentes – construídos em metal. Maioritariamente usados em fundição injetada, fundição centrífuga, entre outras.

No que concerne a este tipo de moldes, as peças obtidas apresentam uma precisão dimensional e acabamento superficial muito bons. Com apenas um molde, é possível produzir um elevado número de peças, e no caso de o molde carecer de reparação, essa poderá ser efetuada.

Usualmente, este tipo de molde é usado em ligas não ferrosas, em grande parte pelo seu baixo ponto de fusão. A Figura 13 apresenta um exemplo de um molde permanente.

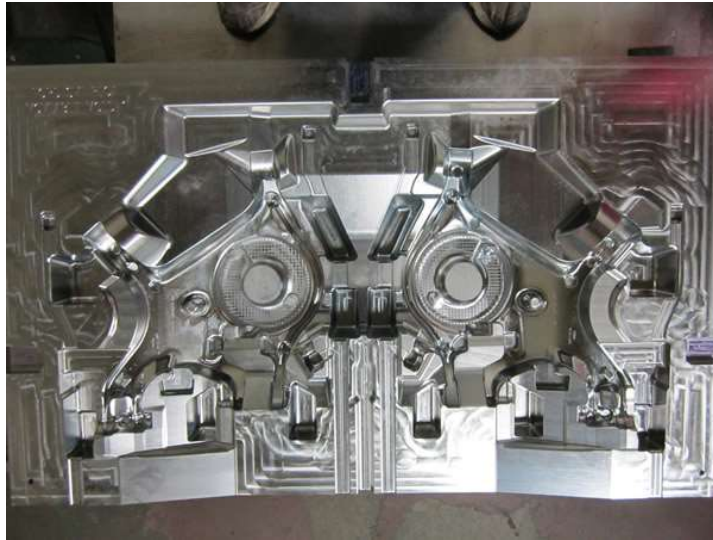


Figura 13 - Exemplo de molde permanente [30]

## 2.2 Fundição Injetada

No processo de fundição injetada, o metal líquido enche as cavidades presentes no molde. Por norma, o metal líquido é injetado com uma pressão entre os 70 e os 3500 bar, o equivalente a 7 e 350 MPa, respetivamente. Esta pressão mantém-se até que as peças se solidifiquem por completo, no entanto, as pressões são variáveis e podem ou não ser controladas, dependendo da máquina em questão. De referir que a força de aperto dos equipamentos de injeção deverá ser suficientemente alta para possibilitar a manutenção do fecho do molde, quer durante, quer após o enchimento das cavidades (onde será aplicada a máxima força de injeção do metal líquido). Após se verificar a solidificação das peças, procede-se à abertura do molde e removem-se os cachos das peças. As principais vantagens do uso do processo de fundição injetada são [31-32]:

- Capacidade de produzir peças com geometria complexa;
- Possibilidade de produzir peças de secção fina, na ordem de 0,5 mm;
- Capacidade produtiva de peças com bom acabamento;
- Reduzir ou eliminar operações secundárias de maquinagem;
- Cadência produtiva elevada;
- Preços competitivos ao nível de produção em série;
- Capacidade de produzir peças com tolerância dimensional rigorosa, especialmente ao nível da produção de peças de reduzida dimensão;

- Produção de peças com elevada resistência mecânica, devido à estrutura morfológica obtida, graças às elevadas velocidades de solidificação e arrefecimento.

Desta forma, o processo de fundição injetada poderá ser efetuado de dois modos distintos [4]:

- Fundição injetada em câmara fria;
- Fundição injetada em câmara quente.

De seguida, irão ser descritos ambos os processos, embora dando mais ênfase ao processo de injeção em câmara quente, uma vez que esse será o processo utilizado ao longo de todo o trabalho.

### 2.2.1 Injeção em câmara fria

Começando por descrever sucintamente o processo de injeção em câmara fria, neste caso o metal é fundido num forno à parte e, com uma colher de vazamento, ele é recolhido e vazado para a câmara de injeção, que se encontra na superfície. O cilindro de injeção, no caso da câmara fria, encontra-se na posição horizontal, ao contrário do que se irá verificar posteriormente com o sistema de injeção em câmara quente [4].

Na Figura 14 podem verificar-se as diferentes partes constituintes dos equipamentos de injeção em câmara fria e constatar que estes tipos de equipamentos poderão ser divididos em três áreas distintas: Unidade de aperto, Montagem do molde e Sistema de injeção.



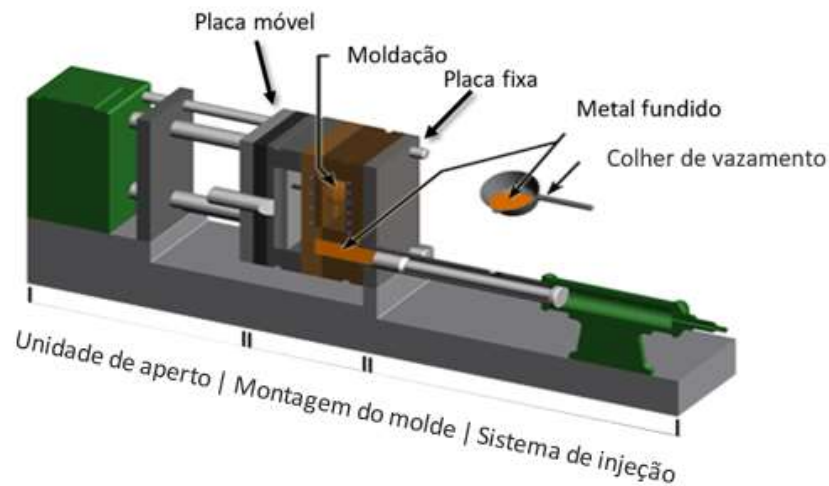


Figura 14 - Áreas constituintes de uma máquina de injeção em câmara fria [33]

Na Figura 15 apresenta-se um exemplo de equipamento de injeção de câmara fria.



Figura 15 - Exemplo de máquina de injeção por câmara fria [34]

Após demonstrar os elementos essenciais que compõem os equipamentos para injeção em câmara fria e o seu princípio de funcionamento, devem agora descrever-se as diferentes fases deste processo, desde o metal líquido até à peça final obtida.

Assim, a **primeira fase** do processo é vazar o metal líquido proveniente de um forno de fundição para a câmara de injeção, dispondo do êmbolo recolhido e do molde fechado, conforme se poderá verificar pela Figura 16 [4].



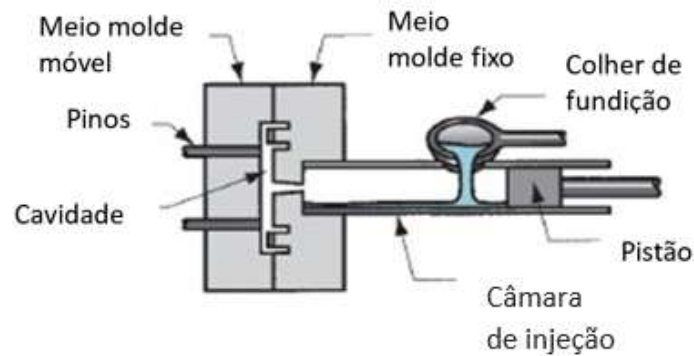


Figura 16 - Vazar o metal fundido para a câmara de injeção [35]

A **segunda fase** do processo consiste no enchimento da cavidade, que deve ser feito a uma velocidade rápida, de forma a forçar o material a preencher toda a cavidade, por ação do êmbolo do cilindro de injeção. Atentar na Figura 17.

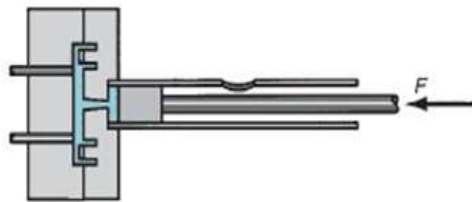


Figura 17 - Enchimento das cavidades promovido pela ação do pistão [35]

Na **terceira fase**, o material deve ser mantido a uma pressão constante, até se verificar a solidificação total das peças. De referir que, em processos com peças de grandes dimensões e pouco rigor dimensional, as pressões de injeção usadas, são bastante elevadas (situam-se entre os 140 e 1400 bar). No final, verificar-se-á a recolha do êmbolo, a abertura do molde e a ejeção das peças fundidas, conforme se poderá analisar através da Figura 18. A ejeção das peças fundidas pode ser feita através de extratores devidamente montados no molde.

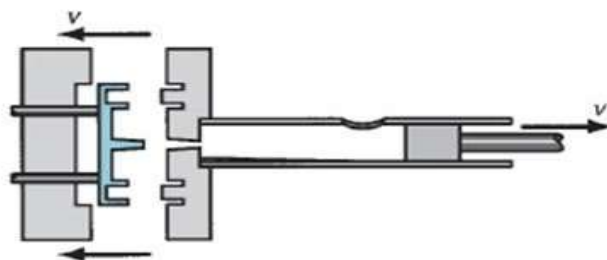


Figura 18 - Recolha do êmbolo e abertura do molde [35]

### 2.2.2 Injeção em câmara quente

É o processo em estudo ao longo deste trabalho e difere do processo de injeção em câmara fria, já que o sistema de injeção se encontra submerso no metal líquido. Esta característica permite a obtenção de um processo bastante mais rápido e automatizado [4].

Na Figura 19 podem verificar-se as diferentes partes constituintes dos equipamentos de injeção em câmara quente e constatar que este tipo de equipamentos também se pode subdividir pelas mesmas três áreas (tal como nos equipamento de injeção em câmara fria): Unidade de aperto, Montagem do molde e Sistema de injeção. A Figura 20 mostra um exemplo de uma máquina de injeção por câmara quente.

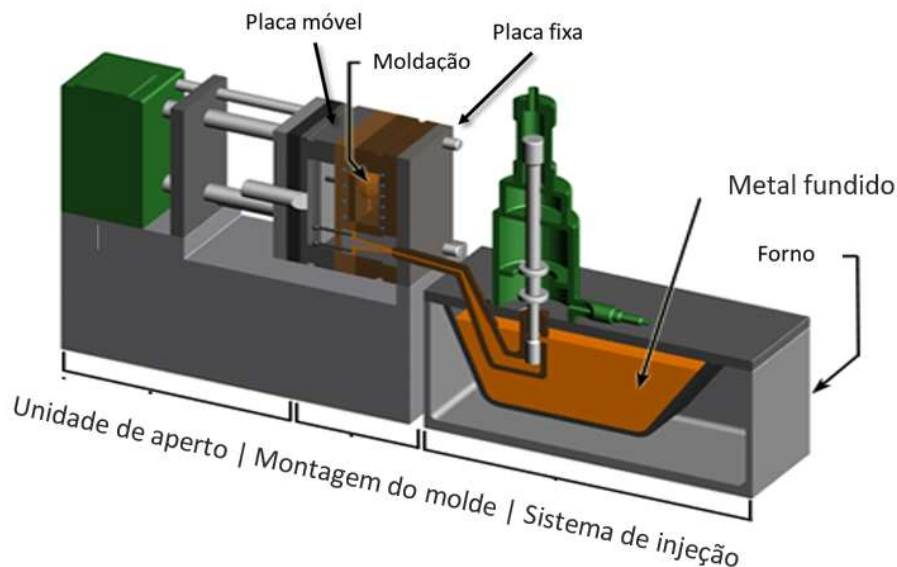


Figura 19 - Áreas constituintes de uma máquina de injeção em câmara quente [36]



Figura 20 - Exemplo de máquina de injeção por câmara quente de 15 toneladas de pressão de fecho [37]

Neste processo, existem três fases que serão agora explicadas.

A **primeira fase** do processo em análise consiste em manter o molde fechado enquanto o pistão é recolhido, por forma a permitir a entrada do metal líquido na câmara de injeção, conforme ilustrado na Figura 21 [4].

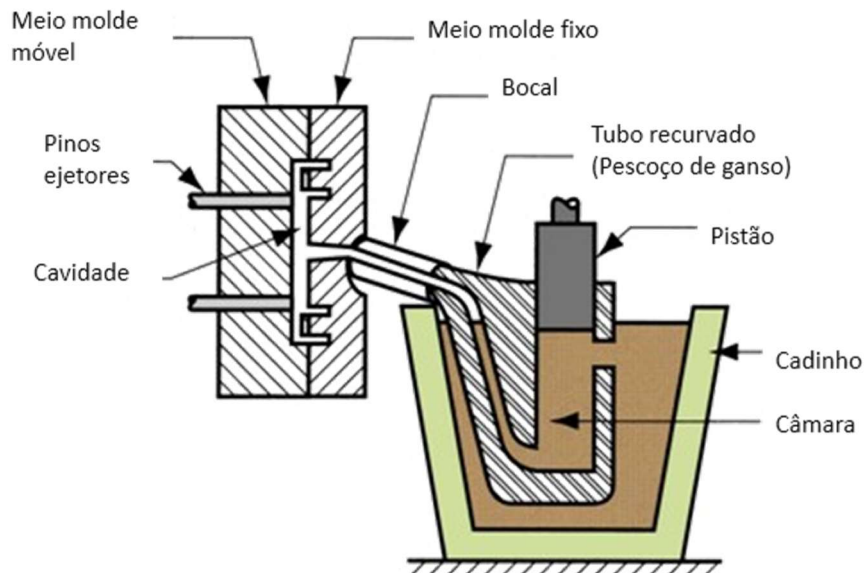


Figura 21 - Recolha do pistão com o molde fechado [38]

A **segunda fase** do processo, mostrada na Figura 22, consiste em forçar a injeção do metal líquido na câmara, por ação do êmbolo, de forma a encher as cavidades. É relevante ter em conta que é necessário manter a pressão durante o arrefecimento e solidificação das peças, podendo essa pressão ser ou não ser constante ao longo do processo [4].

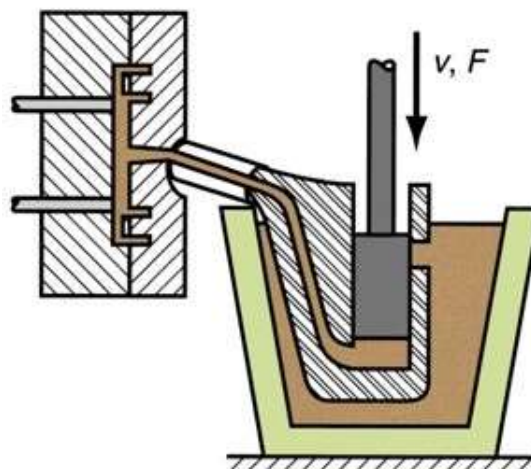


Figura 22 - Pistão é empurrado para iniciar a injeção do metal fundido no molde [38]

De referir que as pressões de injeção usadas neste processo se situam entre os 70 e 350 bar, para peças de grandes dimensões ou sem rigor dimensional.

Por fim, na **terceira fase**, logo após a solidificação das peças, verifica-se a recolha do pistão, a abertura do molde e subsequente ejeção das peças fundidas, conforme se pode analisar na Figura 23 [4].

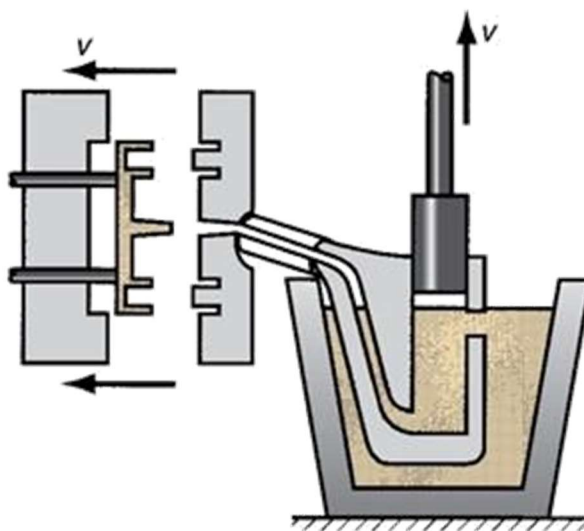


Figura 23 - Recolha do pistão e abertura do molde [39]

A maior desvantagem deste processo é a rápida deterioração não só do pistão, como também de múltiplos componentes mecânicos que se encontram mergulhados no metal líquido. Por esta razão, torna-se necessário limitar o campo de aplicação do processo de fundição injetada em câmara quente a ligas que apresentem um baixo ponto de fusão, e que não se apresentem como ligas que potencialmente atacam quimicamente o material dos componentes imersos no metal fundido [40-41].

Assim, neste processo de fundição injetada, para fabrico continuado, podem usar-se apenas alguns tipos de ligas, como por exemplo as ligas de zinco, estanho e chumbo.

### 2.2.3 Defeitos de fundição injetada

A fundição injetada apresenta alguns defeitos mais comumente presentes, os quais se podem agrupar por tipos, entre eles podem enumerar-se os seguintes [42]:

### *Defeitos relacionados com a presença de ar ou gases*

- **Poros**, estes assemelham-se a pequenas cavidades esféricas no interior da peça fundida. Este fenómeno deve-se à presença de gases durante o processo de injeção, que podem já existir no metal, ou entrosar-se no mesmo posteriormente. Esses gases podem ser provenientes da libertação de gás pela presença de óxidos no metal, do gás dissolvido no metal, do aprisionamento de gás na camisa de injeção, ou podem mesmo formar-se durante a própria injeção. Por norma, a causa mais frequente do aparecimento de poros é quando ocorre aprisionamento de metal devido a turbulências durante a injeção [42-43].
  - Através da análise de características como a cor, a morfologia, o brilho ou a localização dos poros, é possível distinguir o que está na origem da sua formação. Quando as porosidades se devem à presença de gases, normalmente têm o nome de *Blisters*, e podem ocorrer não apenas durante o processo de injeção, como também num tratamento térmico posterior, já que são causados pelo aumento da temperatura [43]. Ver Figura 24.

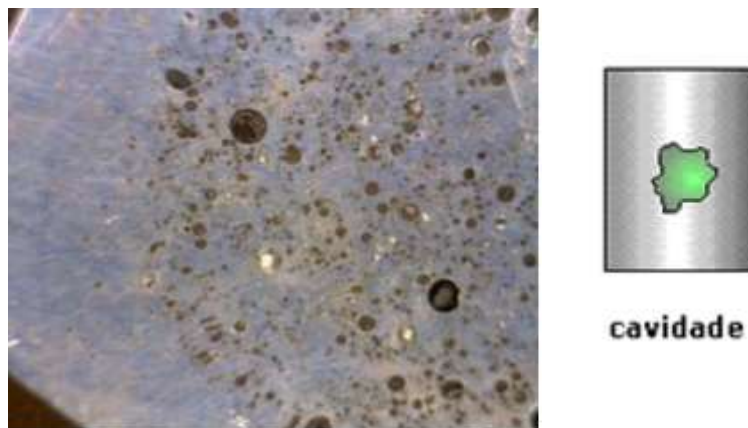


Figura 24 - Exemplo de porosidades [44-45]

### *Defeitos relacionados com a injeção*

- **Preenchimento deficiente**, é resultado da falta de enchimento do material ao longo do fluxo de injeção. Seja pela falta de temperatura no material, pela injeção demasiado longa que provoca o seu arrefecimento mais cedo do que o

esperado, pela pouca quantidade de material injetado, por baixa pressão ou até mesmo pelo fluxo do material que é mal projetado, o que acontece é que o material solidifica antes de preencher toda a cavidade [42]. Ver Figura 25.



Figura 25 - Exemplo de preenchimento deficiente [45]

- **Juntas frias**, que pela sua forma, podem confundir-se com uma fissura, mas que são resultado da junção de duas frentes frias de material [42].
- **Gotas frias**, surgem em agregados de forma circular na peça e são, basicamente, partes do metal que foram projetadas contra as paredes da cavidade do molde, sem que fluíssem normalmente com o resto do metal pela cavidade, acabando por assemelhar-se a juntas frias [42]. Ver Figura 26.



Figura 26 - Exemplo de gotas frias [45]

- **Marcas de fluxo**, são o resultado de um arrefecimento prematuro do material no molde que, em contacto com a parede do mesmo, vai criar marcas que acompanham o seu fluxo ao longo da injeção [46].

*Defeitos relacionados com a construção do molde*

- **Rebarba**, ocorre normalmente quando o fecho do molde não é bem executado e este não consegue aguentar elevadas pressões, fazendo com que o material “escape” pelas linhas de fecho do molde. Não é mais do que um excesso de material, onde este não deveria existir.



Figura 27 - Exemplo de rebarba [45]

- **Desencontro**, acontece quando o fecho do molde não se encontra alinhado.

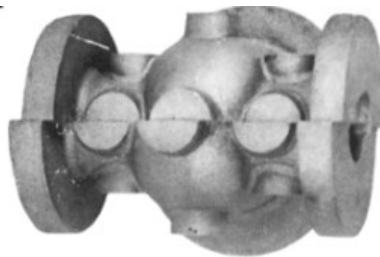


Figura 28 - Exemplo de desencontro [47]

*Defeitos relacionados com a contração*

- **Rechupes**, têm o aspeto de uma cavidade porosa, mas com diferente forma e aspeto, já que as suas paredes são irregulares. Estes são formados devido a contrações metálicas no momento da solidificação, caso haja ausência de alimentação suplementar de metal, ou não haja pressão suficiente. Ocorre também, normalmente, nas últimas zonas a solidificar (zonas mais mássicas) [42-43]. Ver Figura 29.



Figura 29 - Exemplo de Rechupes [45,48]



- **Cavidades**, caracterizam-se por grandes depressões de retração formadas em pontos quentes. Essas cavidades apresentam superfícies rugosas e esponjosas devido à formação de dentrites, como consequência do seu crescimento interrompido [43].
- **Bolhas**, em tudo semelhantes aos poros, com a diferença que se manifestam na superfície da peça. No caso de se tratar de peças finas, as bolhas poderão aparecer nas duas faces da mesma parede [42].

#### *Defeitos relacionados com a contração térmica*

- **Fissuras**, ocorrem de forma irregular, normalmente devido a contrações do material que ocorrem após a solidificação. Ou seja, ocorrem a temperaturas relativamente baixas. As tensões criadas na peça podem atingir valores elevados, o que também leva ao aparecimento de fissuras [42-43]. Ver Figura 30.



Figura 30 - Exemplo de fissuras [44]

- **Lágrimas**, este defeito ocorre normalmente em regiões de elevado nível de tensões, sejam elas causadas por razões geométricas macroscópicas ou pela presença prévia de defeitos microestruturais [43].

#### *Defeitos relacionados com fases indesejadas*

- **Contaminação**, esta ocorre quando partículas estranhas (de outro material) se juntam ao material fundido ou às cavidades do molde, provocando defeitos na forma da peça injetada. Cria oclusões na peça moldada e superfícies indesejadas.



### *Defeitos relacionados com a interação metal-molde*

- **Marcas de fadiga térmica**, ocorrem ao fim de um determinado número de solicitações, e formam fissuras na superfície ao longo das suas fases críticas de trabalho.

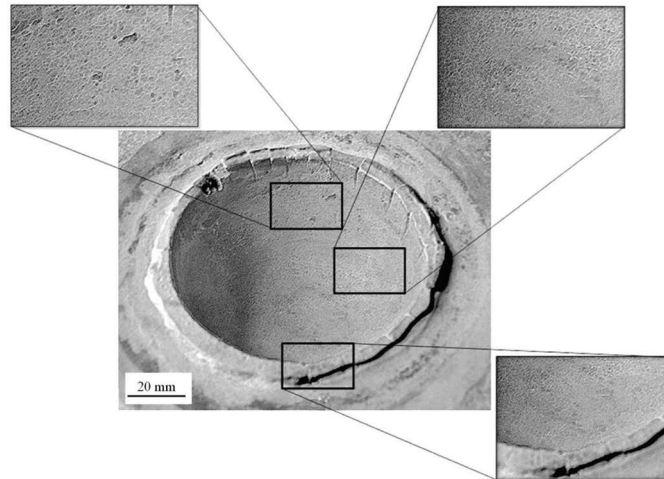


Figura 31 - Exemplo de marcas de fadiga térmica [49]

- **Erosão**, é o defeito que ocorre com a remoção progressiva do material do molde por desgaste erosivo. Isto reflete-se essencialmente nas regiões onde o material flui com maior velocidade e temperatura, causando o defeito no aspeto da peça final.
  - Este defeito pode ser evitado através do uso de um lubrificante não corrosivo no molde.
- **Corrosão do molde**, manifesta-se na peça através de um aspeto grosseiro, causado pela área atacada do molde.

## 2.3 O Zamak

Sendo que o Zamak é o material em estudo neste trabalho, torna-se essencial estudá-lo ao nível da sua composição química e propriedades mais relevantes. O estudo será dirigido essencialmente para o Zamak 5, uma vez que se trata do material em uso pela PR-Metal, e para o Zamak 3, já que será o material substituto do primeiro.

O Zamak, não sendo diretamente um metal, trata-se de uma liga metálica de baixo custo constituída principalmente por Zinco, Alumínio, Magnésio e Cobre. Foi desenvolvida no início do século XX, nos Estados Unidos, com formulações adequadas para a aplicação em processos de fundição por gravidade [50].

### 2.3.1 Composição química típica

Tipicamente, e como já foi referido, estas ligas são constituídas essencialmente por Zinco, Alumínio, Magnésio e Cobre (daqui advém o seu nome: Zink-Aluminium-Magnesium-Kupfer) [51]. As suas diferentes ligas variam consoante a percentagem de cada constituinte. As percentagens de Zinco e Alumínio são semelhantes entre as diferentes ligas, uma vez que são a base que as constitui. O Cobre é um dos elementos que permite identificar a liga. Este elemento tem maior presença no Zamak 2 e no Zamak 5, e permite dar maior resistência à liga. No entanto, as ligas com menos presença de Cobre são muito mais fluídas e detentoras de um alongamento elástico mais elevado. Esta informação pode ser consultada no Anexo 1.

Na Tabela 1, estão apresentados os nomes comerciais das principais ligas e respetivas nomenclaturas pela Norma ASTM B86, bem como as percentagens correspondentes dos seus constituintes.

Tabela 1 - Nomes comerciais das principais ligas e respetivas nomenclaturas pela Norma ASTM B86 (ver Anexo 1)

Designação	Grupo da Liga	ZINCO	ZINCO	ZINCO	ZINCO
	Designação ASTM	AC43A	AG40A	AC41A	AG40B
	Designação geral	ZAMAK 2	ZAMAK 3	ZAMAK 5	ZAMAK 7
Composição percentual em massa	Al - Alumínio	3,5 - 4,3	3,5 - 4,3	3,5 - 4,3	3,5 - 4,3
	Cu - Cobre	2,5 - 3,0	0,25 máx.	0,75 - 1,25	0,25 máx.
	Mg - Magnésio	0,02 - 0,05	0,02 - 0,05	0,03 - 0,08	0,005 - 0,02
	Fe – Ferro (máx.)	0,100	0,100	0,100	0,075
	Pb – Chumbo (máx.)	0,005	0,005	0,005	0,003
	Cd – Cádmio (máx.)	0,004	0,004	0,004	0,002
	Sn – Estanho (máx.)	0,003	0,003	0,003	0,001
	Ni – Níquel	---	---	---	0,005 - 0,020
	Zn - Zinco	Restante	Restante	Restante	Restante

Em suma:

- Zamak 2 – em comparação com outras ligas, oferece maior eficácia a nível da fluência e resistência a longo prazo. É normalmente utilizado como material de chumaceira, eliminando o uso de casquilhos de desgaste e insertos em componentes injetados;
- Zamak 3 – caracterizado essencialmente pela sua ductilidade e resistência ao impacto. É apropriado para revestimentos múltiplos e para várias opções de acabamento;
- Zamak 5 – é usualmente utilizado para peças funcionais na área automóvel devido à sua resistência à fluência, dureza e resistência [52].

Para além do Zamak 2, do Zamak 3 e Zamak 5, outra liga de Zamak bastante apropriada para o processo de fundição por câmara quente é o ZA-8. Estas ligas são indicadas para o processo de fundição, já que são capazes de produzir paredes muito finas, atingir grandes níveis de precisão, possuem grande flexibilidade a uma temperatura mínima até 65°C e resistência ao desgaste. Permitem criar peças complexas com tolerâncias apertadas [52].

- ZA-8 – apesar de apresentar maior resistência do que o Zamak 3 e o Zamak 5, funciona também muito bem com revestimentos e outras opções de acabamento [52].

O Zamak é indicado para processos de fundição injetada, já que permite processos de grande cadência e baixo custo. O facto de permitir peças que praticamente se encontram na sua forma final e com o aspeto requerido pelo cliente permite evitar outros processos como a maquinagem para atingir o resultado pretendido.

De seguida são apresentadas a Tabela 2 e a Tabela 3, que mostram a composição química de cada liga de Zamak.

Tabela 2 - Composição química do Zamak e percentagem de cada componente na liga [53] (ver Anexo 2)

<b>Composição Química (EN1774)</b>	<b>ZAMAK 2 ZL2/ZL0430</b>	<b>ZAMAK 3 ZL3/ZL0400</b>	<b>ZAMAK 5 ZL5/ZL0410</b>	<b>ZA8 ZL8/ZL0810</b>
<b>Análise em % de massa</b>	<b>ZnAl4Cu3</b>	<b>ZnAl4</b>	<b>ZnAl4Cu1</b>	<b>ZnAl8Cu1</b>
<b>Al</b>	3,8-4,2	3,8-4,2	3,8-4,2	8,2-8,8
<b>Cu</b>	2,7-3,3	≤ 0,003	0,7-1,1	0,9-1,3
<b>Mg</b>	0,035-0,06	0,035-0,06	0,035-0,06	0,02-0,03
<b>Pb</b>	≤ 0,003	≤ 0,003	≤ 0,003	≤ 0,005
<b>Fe</b>	≤ 0,020	≤ 0,020	≤ 0,020	≤ 0,035
<b>Cd</b>	≤ 0,003	≤ 0,003	≤ 0,003	≤ 0,005
<b>Sn</b>	≤ 0,001	≤ 0,001	≤ 0,001	≤ 0,002
<b>Si</b>	≤ 0,02	≤ 0,02	≤ 0,02	≤ 0,035
<b>Ni</b>	≤ 0,001	≤ 0,001	≤ 0,001	≤ 0,001

Tabela 3 - Percentagem de cada componente na liga [43] (ver Anexo 1)

<b>Análise típica (em % de massa)</b> <b>(Referência 2008)</b>	<b>ZAMAK 2 ZL2/ZL0430</b>	<b>ZAMAK 3 ZL3/ZL0400</b>	<b>ZAMAK 5 ZL5/ZL0410</b>	<b>ZA8 ZL8/ZL0810</b>
	<b>ZnAl4Cu3</b>	<b>ZnAl4</b>	<b>ZnAl4Cu1</b>	<b>ZnAl8Cu1</b>
<b>Al</b>	3,99826	4,08637	3,99826	8,42138
<b>Cu</b>	2,89784	0,00020	0,83732	1,06345
<b>Mg</b>	0,04271	0,04514	0,04402	0,02286
<b>Pb</b>	0,00271	0,00170	0,00183	0,00218
<b>Fe</b>	0,00305	0,00216	0,00238	0,00421
<b>Cd</b>	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0003
<b>Sn</b>	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
<b>Si</b>	< 0,02	< 0,001	< 0,001	< 0,001
<b>Ni</b>	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001

### 2.3.2 Propriedades físicas e mecânicas

No que toca a propriedades físicas e mecânicas, o Zamak tem comportamentos diferentes conforme a variação dos seus constituintes, como já foi visto. Na Tabela 4 são apresentados os valores ao nível das propriedades físicas para cada liga.

Tabela 4 - Propriedades físicas de algumas ligas de Zamak (ver Anexo 1)

<b>Designação</b>	<b>Grupo da Liga</b>	<b>ZINCO</b>	<b>ZINCO</b>	<b>ZINCO</b>	<b>ZINCO</b>
	<b>Designação ASTM</b>	<b>AC43A</b>	<b>AG40A</b>	<b>AC41A</b>	<b>AG40B</b>
	<b>Designação geral</b>	<b>ZAMAK 2</b>	<b>ZAMAK 3</b>	<b>ZAMAK 5</b>	<b>ZAMAK 7</b>
<b>Propriedades físicas</b>	<b>Densidade</b>				
	<b>kg/m<sup>3</sup></b>	6655	6600	6700	6600
	<b>Lb/in<sup>3</sup></b>	0,240	0,238	0,242	0,24
	<b>Intervalo de fusão</b>				
	<b>°C</b>	379-390	381-387	380-386	381-387
	<b>°F</b>	715-734	718-728	717-727	718-728
	<b>Coefficiente de expansão térmica</b>				
	<b>µm/mK</b>	27,8	27,4	27,4	27,4
	<b>µin/in/°F</b>	15,4	15,2	15,2	15,2
	<b>Condutividade térmica</b>				
	<b>W/mK</b>	104,7	113,0	108,9	113,0
	<b>BTU/ft.hr.°F</b>	60,5	65,3	62,9	65,3
	<b>Condutividade elétrica</b>				
	<b>10<sup>-9</sup> Ω.m</b>	68,4	63,9	66,3	63,9
	<b>% IACS</b>	25,0	27,0	26,0	27,0

Como se pode verificar através da informação fornecida pela Tabela 4, o ponto de fusão deste material varia muito pouco de liga para liga, sendo que, dependendo do grau de pureza da liga, o seu ponto de fusão pode oscilar entre os 380°C e os 390°C. A liga mais densa é o Zamak 5, devido à sua concentração de Cobre.

O coeficiente de expansão térmica pode considerar-se similar para todas as ligas apresentadas (ver Tabela 5 mostrada de seguida). No entanto, a sua condutividade térmica varia, sendo que o valor é mais elevado nas ligas de Zamak 3 e de Zamak 7.

Tabela 5 - Propriedades físicas das ligas de Zamak [53] (ver Anexo 2)

Dados Físicos	ZAMAK 2 ZL2/ZL0430 ZnAl4Cu3	ZAMAK 3 ZL3/ZL0400 ZnAl4	ZAMAK 5 ZL5/ZL0410 ZnAl4Cu1	ZA8 ZL8/ZL0810 ZnAl8Cu1
Densidade (kg/dm <sup>3</sup> a 20°C)	6,8	6,6	6,7	6,3
Intervalo de solidificação (°C)	379-390	381-387	380-386	375-404
Contração em %	4-5	4-5	4-5	8
Coeficiente de expansão térmica (coef./°C)	27,8 x 10 <sup>-6</sup>	27,4 x 10 <sup>-6</sup>	27,4 x 10 <sup>-6</sup>	23,2 x 10 <sup>-6</sup>
Condutividade elétrica (%IACS)	25	27	26	27,7

Relativamente às propriedades mecânicas das ligas, estas encontram-se apresentadas de seguida na Tabela 6.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas das ligas de Zamak (ver Anexo 1)

Designação	Grupo da Liga	ZINCO	ZINCO	ZINCO	ZINCO
	Designação ASTM	AC43A	AG40A	AC41A	AG40B
	Designação geral	ZAMAK 2	ZAMAK 3	ZAMAK 5	ZAMAK 7
Propriedades mecânicas	Resistência à tração				
	MPa	359	283	328	283
	Psi	52,000	41,000	47,600	41,000
	Tensão limite convencional de proporcionalidade a 0.2 %				
	MPa	283	221	228	221
	Psi	41,000	32,000	33,000	32,000
	Resistência à compressão (0.1% offset)				
	MPa	641	414	600	414
	Psi	93,000	60,000	87,000	60,000
	Alongamento (% em 51 mm)	7	10	7	13

<b>Tensão de corte</b>				
<b>MPa</b>	317	214	262	214
<b>Psi</b>	46,000	31,000	38,000	31,000
<b>Dureza</b>				
<b>BHN (Brinell)</b>	Até 100	Até 82	Até 91	Até 80
<b>Força de impacto</b>				
<b>J</b>	47,5	58,3	65,1	58,3
<b>ft. lbs.</b>	35	43	48	43
<b>Tensão de fadiga (Curva rotativa 5x10<sup>8</sup> ciclos)</b>				
<b>MPa</b>	58,6	47,6	56,5	46,9
<b>psi</b>	8,500	6,900	8,200	6,800

Como se pode verificar pelos valores apresentados de resistência à tração, o Zamak 5 é uma das ligas mais resistentes, sendo esta uma das razões pelas quais esta é a liga preferida para quase todos os fins funcionais. No entanto, a que detém maior valor de alongamento é o Zamak 7 e, seguidamente, o Zamak 3. O Zamak 3 acaba por ser a segunda escolha mais comum na seleção das ligas de Zamak, já que possui uma resistência à fadiga maior do que o Zamak 7.

### 2.3.3 Aplicações

Tal como outros materiais, o Zamak pode ter diversas funcionalidades. Pode ser o material constituinte de uma peça com uma funcionalidade específica e, para isso, serem importantes as suas características mecânicas, ou pode simplesmente servir para o mercado de peças estéticas.

Alguns exemplos de aplicação do Zamak podem ser: fechos, peças de automóveis, peças para tubagens, peças de bijuteria, porcas, conexões para instalações de gás, parafusos, trincos para janelas, entre outros.



Figura 32- Exemplo de peças em Zamak [54-57]

## 2.4 Simulação aplicada à fundição

Atualmente, existem ferramentas informáticas de todo o tipo para facilitar nas atividades do dia-a-dia. Na Engenharia de Materiais isso não é diferente. Existem ferramentas informáticas de simulação de injeção para quase todos os tipos de materiais, sendo que essas ferramentas são mais comuns, sobretudo, para materiais plásticos e metais. Estas assumem um papel cada vez mais importante no mercado atual, onde cada vez mais se exigem peças com maior complexidade e rigor.

No estudo em questão, é particularmente importante estudar o comportamento do Zamak. Isto porque a peça em questão não depende de características mecânicas para ser aceite como OK, mas sim do seu aspeto exterior e, para isso, é necessário conhecer o comportamento do material, percebendo de que forma este pode influenciar o resultado final. Com o auxílio destas ferramentas informáticas, o objetivo é melhorar o rendimento e a qualidade da fundição injetada.

### 2.4.1 Interesse da simulação

A principal razão pela qual se investiu neste estudo do comportamento do material à injeção foi precisamente para melhorar a qualidade e aspeto do produto final.

Aqui, a ferramenta utilizada foi o *SolidCast™*, no entanto, existem outras no mercado. Por isso, irão ser resumidamente descritos alguns *softwares* que existem atualmente para o estudo do modo de enchimento do molde e respetivo ciclo de solidificação na injeção dos metais fundidos.

### 2.4.2 Ferramentas informáticas disponíveis no mercado

**QuikCAST e ProCAST**, são ferramentas de simulação de fundição, em que a primeira é uma ferramenta rápida, mais leve e eficiente, apenas para avaliação do processo, enquanto a segunda é já uma ferramenta mais avançada e completa que, baseada no Método dos Elementos Finitos, permite analisar/prever deformações e tensões



residuais. O *QuikCast*, apesar das suas limitações em termos de análise, permite um bom estudo do processo ao nível básico de fundição: preenchimento do molde, solidificação do metal vazado e previsão de porosidades. Ambos os *softwares* pertencem à empresa *ESI-Group*, que é a única empresa no mundo a produzir dois simuladores de fundição injetada [58].

Ambos os programas servem para simulação de fundição injetada, mas baseados em tecnologias diferentes:

- *QuikCAST* – baseado na tecnologia das diferenças finitas para cálculo do enchimento, solidificação e previsão de porosidades. Exemplo na Figura 33.

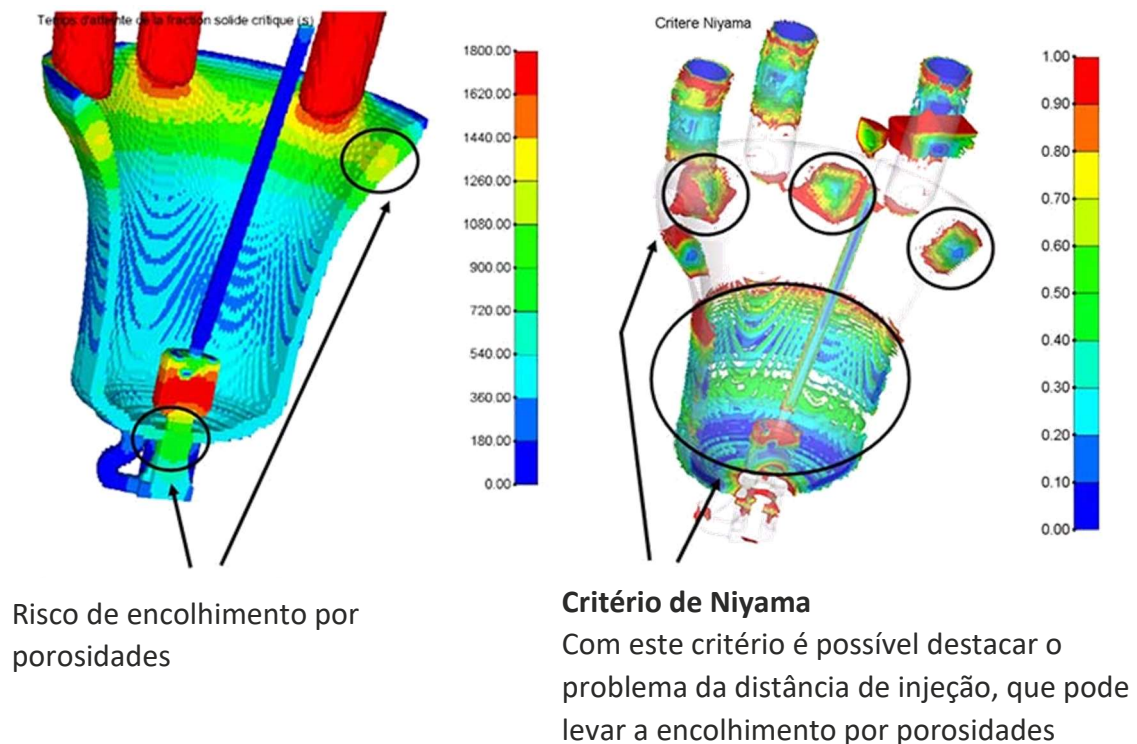


Figura 33 - Análise de resultados através do *software* QuikCAST [59]

- *ProCAST* – baseado na tecnologia de elementos finitos para simular os processos de fundição com maior precisão e assertividade, permite uma performance muito melhor quando comparado com o *QuikCAST*. É capaz

de prever distorções e tensões residuais, assim como dar resposta a processos mais complexos.

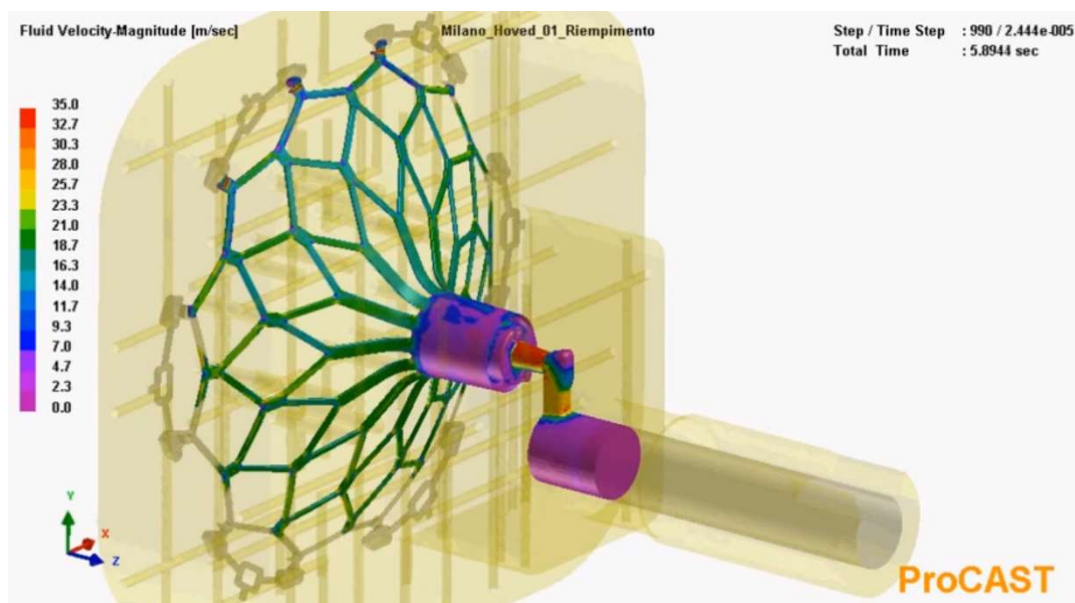


Figura 34 - Análise de resultados através do *software* ProCAST [60]

**Salsa 3D**, é um *software* complementar aos anteriormente apresentados, que permite calcular e dimensionar ataques à peça a injetar e sistemas de injeção para processos de fundição a altas pressões. Trata-se de uma ferramenta para conceção dos sistemas de injeção para as peças injetadas. Realiza os seus cálculos com base na velocidade máxima do ponto de injeção e na pressão disponível na máquina.

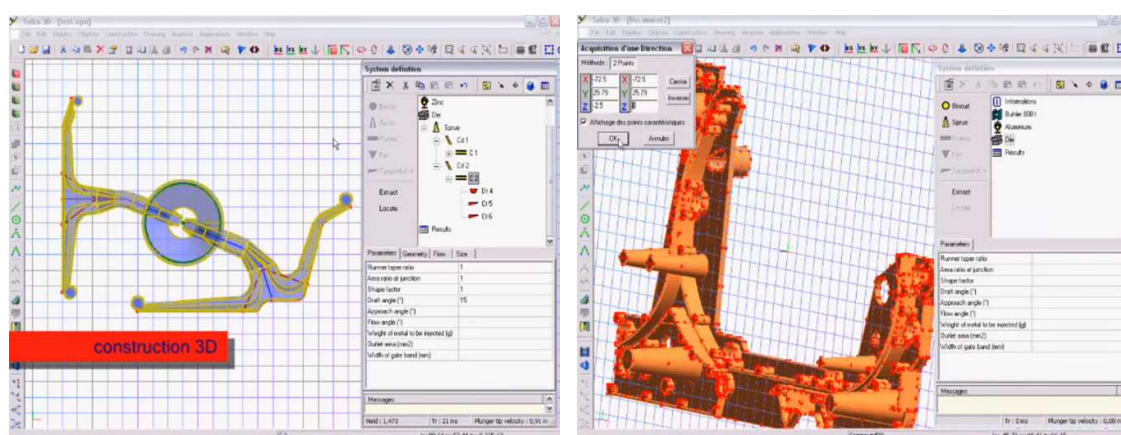


Figura 35 - Análise de resultados através do *software* Salsa 3D [61]

**Flow3D**, é um *software* de simulação de fluxo de material baseado na tecnologia de dinâmica de fluidos computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*), e serve

essencialmente para análise do fluxo do metal fundido. É capaz de analisar a solidificação do metal, a sua contração térmica, eventuais porosidades, deformações e tensões residuais, definição de canais frios, entre outros. Distingue-se de outras ferramentas já que, na análise de fluxo, é possível observar determinados aspetos (por exemplo, no molde) que podem ser modificados de forma a evitar certos constrangimentos na obtenção da peça final [62].

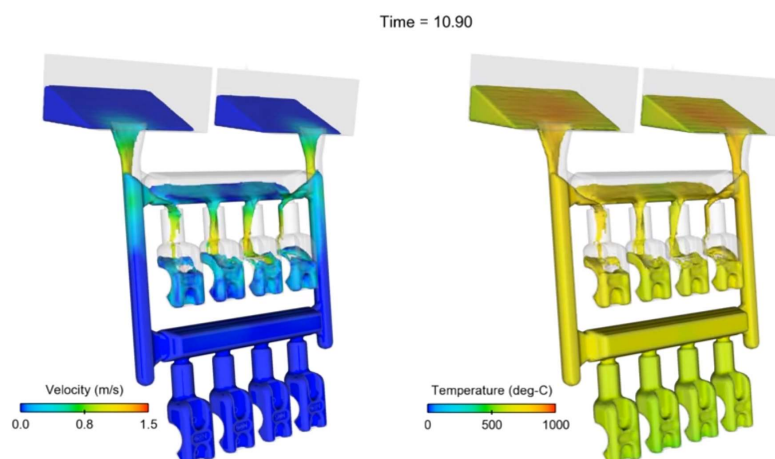


Figura 36 - Análise de resultados através do *software* Flow 3D [63]

#### 2.4.3 *SolidCast™*

Como referido anteriormente, o *SolidCast™* foi a ferramenta de simulação utilizada neste trabalho. Este *software* é uma ferramenta que, tal como as anteriormente apresentadas, permite efetuar o estudo de processos de fundição injetada. Desde o desenho dos alimentadores e pontos de injeção, até à solidificação do material, permite ter uma análise completa de vários parâmetros. Dentro do *SolidCast™* existe o *FlowCast* e o *OptiCast* que permitem, respetivamente, um estudo da dinâmica de fluidos computacional para perceber o fluxo do material e uma análise mais pormenorizada sobre aspetos do processo que podem ser melhorados, tais como dimensões do alimentador, temperatura de injeção do metal, entre outros.

##### 2.4.3.1 *Princípio de funcionamento*

Com o *SolidCast™*, é possível importar modelos 3D dos sistemas de injeção, ou então desenhá-los diretamente no *software*. Permite realizar a simulação com diversos materiais diferentes, e em diversos tipos de molde.

Para realizar as simulações, é necessário criar uma *Mesh*, que corresponde à discretização 3D em elementos, onde o *software* poderá correr os seus cálculos. Em conjunto com o *FlowCast*, permite analisar o fluxo do material e os seus cálculos de simulação permitem analisar a solidificação da peça fundida. Essencialmente, trata-se de uma ferramenta informática para simulação da injeção de um metal líquido num molde, e a respetiva solidificação e arrefecimento da peça injetada. Utiliza o Método das Diferenças Finitas, combinando a rastreabilidade das mudanças volumétricas do metal, de forma a prever as diferenças de temperatura e volume na injeção, solidificação e arrefecimento.

#### 2.4.3.2 Parâmetros necessários

Para que seja possível realizar os estudos pretendidos, é necessário introduzir os parâmetros ajustados no sistema. Após a criação do projeto em *SolidCast™* e a importação ou desenho do respetivo modelo 3D, deve-se aceder à lista de materiais (ver Figura 39 e Figura 38) para começar a definir todos os materiais a utilizar no estudo.

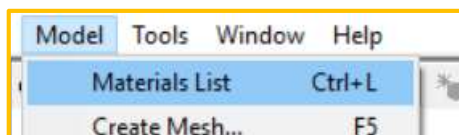


Figura 37 - Parametrização dos materiais em *SolidCast™*

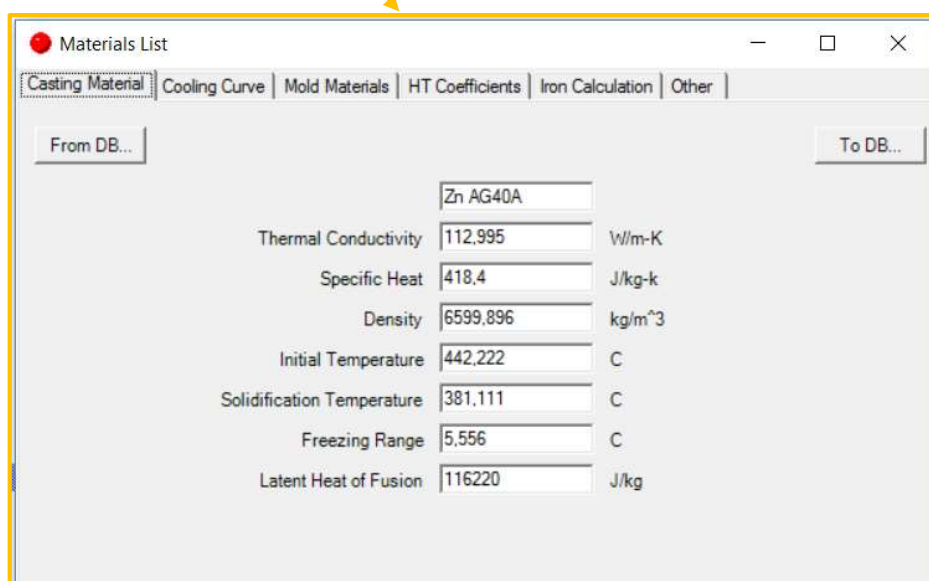


Figura 38 - Menu para aceder à lista de materiais no *SolidCast™*

Aqui, preenchem-se as informações necessárias relativamente a:

- *Casting Material* – Material fundido, pode-se escolher um da base de dados existente ou criar um novo com todos os dados associados. Nesta *tab*, verificam-se e alteram-se, se necessário, algumas características do material, tal como a Condutividade térmica, a Densidade, qual a Temperatura inicial do metal fundido, Temperatura de solidificação, etc.;
- *Cooling Curve* – curva de arrefecimento, aqui pode-se alterar o comportamento do material com o arrefecimento, tendo em conta aspetos como o Ponto de Niyama e o Ponto de solidificação;
- *Mold Materials* – materiais do molde, à semelhança do que acontece na *tab* do material fundido, escolhe-se ou cria-se um novo material na base de dados e escolhe-se o tipo de material do molde, alterando algumas características, se necessário (ver Figura 39);

Parameter	Value	Unit
Material Name	Steel	
InitialTemp	200	C
Thrm Cond	53,618	W
Spc Ht	464,424	J/kg-k
Density	7842,413	kg/m <sup>3</sup>

Material Type options: Normal Mold, Exothermic, Exothermic with Ignition Temp., Permanent Mold Core, Constant Temperature, Cooling Channel.

Figura 39 - Parametrização do material do molde em *SolidCast™*

- *HT Coefficients* – coeficientes de transferência térmica, nesta *tab* colocam-se as relações de transferência térmica entre materiais. A principal dificuldade deste parâmetro está no facto do valor a introduzir ser expresso em percentagem e não numa unidade de transferência térmica (ver Figura 40);

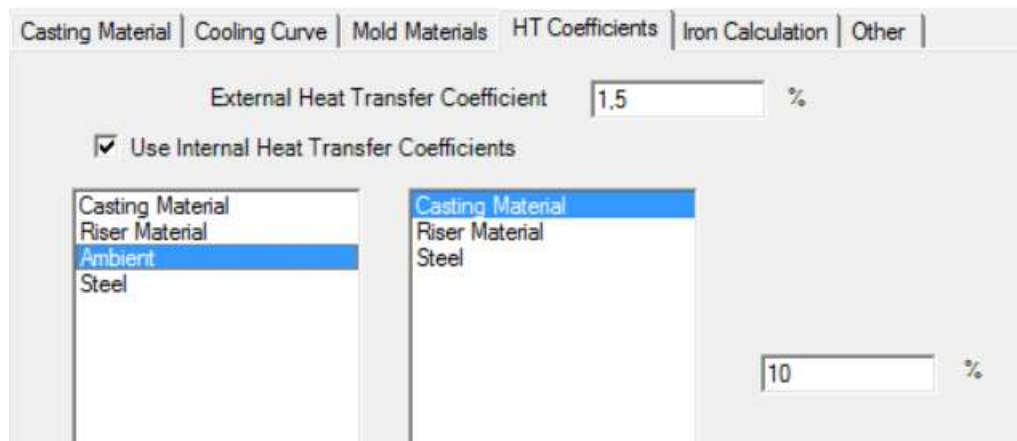


Figura 40 - Parametrização dos coeficientes de transferência térmica em SolidCast™

- *Iron Calculation* – cálculo do ferro, esta *tab* apenas é utilizada para moldes de aço e permite realizar o cálculo das mudanças volumétricas no molde de ferro;
- *Other* – outros, é nesta *tab* que se define a Temperatura ambiente e o tempo de injeção do metal.

Após a definição do modelo 3D e dos parâmetros a adotar no sistema, o passo seguinte é o da criação da *Mesh* que, tal como já foi referido, irá servir de base para a realização dos cálculos. Cada nó irá conter diferentes propriedades geométricas e de material, consoante os parâmetros definidos anteriormente. O tamanho de uma *Mesh* depende da complexidade do modelo que se está a tratar, no entanto, dentro das necessidades do problema, deve-se tentar utilizar o menor número possível de nós, isto porque os cálculos são efetuados a todos os nós um a um e, por isso, quantos mais nós constituírem a *Mesh*, mais tempo será necessário para correr o cálculo.

Para criar a *Mesh*:

- Aceder ao menu para criação da *Mesh* (tal como na Figura 41);

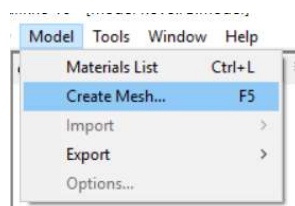


Figura 41 - Criação da *Mesh* em SolidCast™



- Escolher as características da *Mesh* como o Nome, o nº de nós ou o tamanho deles e o tipo de molde (como na Figura 42);

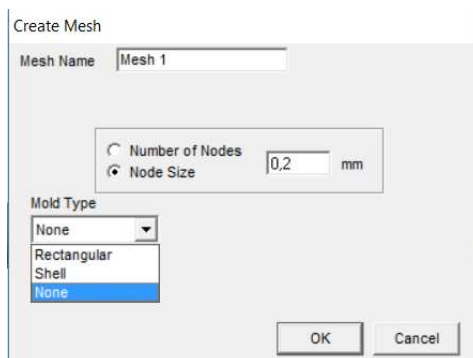


Figura 42 - Parametrização da *Mesh* em SolidCast™

- Aguardar a realização da *Mesh* (ver exemplo de uma *Mesh* na Figura 43).

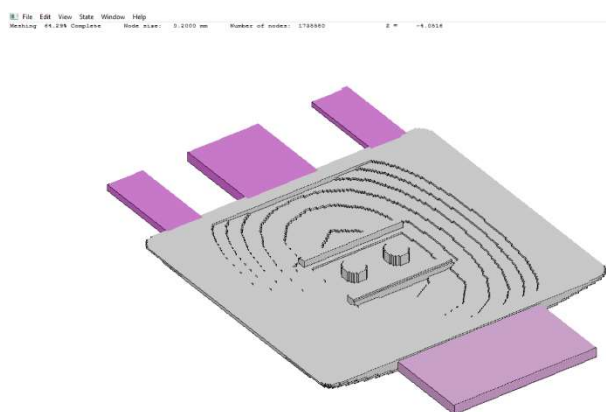


Figura 43 - Realização da *Mesh* em SolidCast™

Depois de se realizar a *Mesh* e de se seleccionar a mesma na árvore de produtos, pode-se aceder ao menu mostrado na Figura 44 para iniciar a realização da simulação:

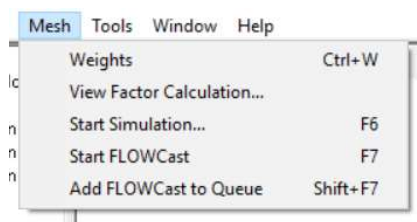


Figura 44 - Menu para iniciar a simulação em SolidCast™

Ou, caso se pretenda primeiramente ajustar parâmetros, aceder ao menu de Parâmetros do sistema, mostrado na Figura 45.

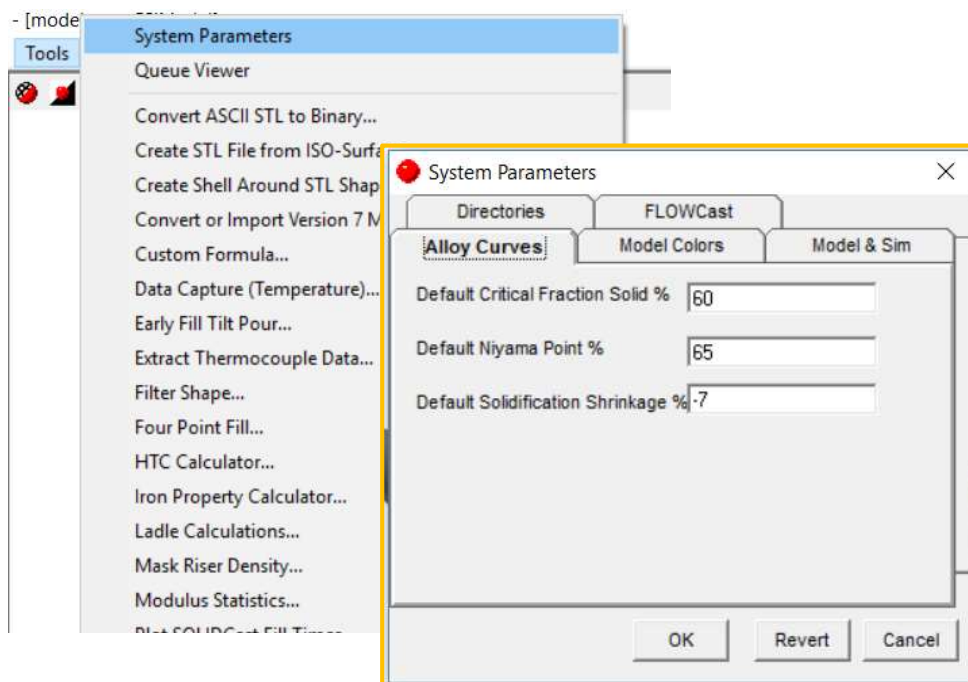


Figura 45 - Parâmetros do sistema em *SolidCast™*

Ainda neste menu, existe a opção de regular os parâmetros da simulação (ver Figura 46):

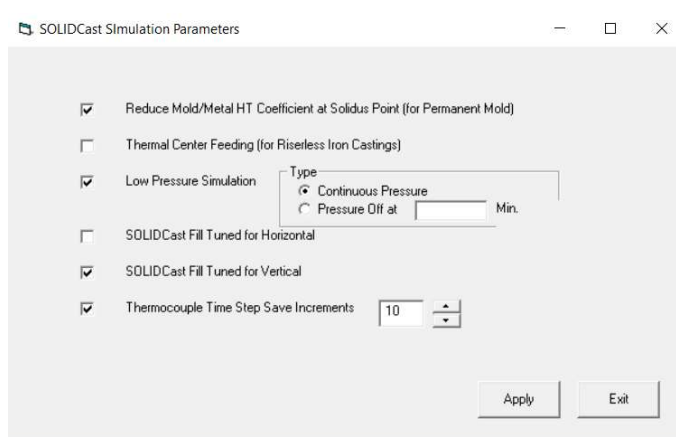


Figura 46 - Parâmetros da simulação em *SolidCast™*

#### 2.4.3.3 Resultados que permite obter

Uma vez realizada a simulação, podem analisar-se os resultados obtidos na mesma. Para isso, podem consultar-se os resultados de simulação de fluxo e temperatura no módulo de *FlowCast*, e os de solidificação e comportamento do material ao nível da possível previsão de defeitos, diretamente no *SolidCast™*.



- *FlowCast* – Permite estudar o comportamento do material ao nível do fluxo de enchimento, mostrando a evolução da temperatura, da pressão e da velocidade em X, Y e Z. Aqui, os resultados podem ser visíveis através de vídeos. Ver Figura 47.

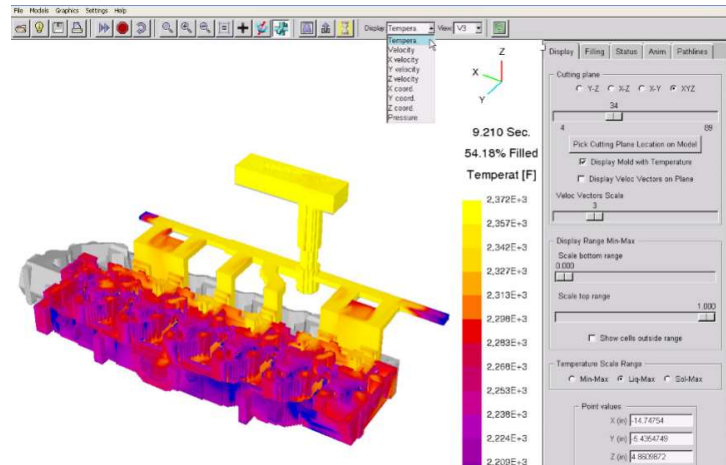


Figura 47 - Imagem exemplificativa de análise de resultados através do *software FlowCast*

- *SolidCast™* – aqui, é possível realizar uma análise mais profunda da simulação, com recurso a imagens em parcelas únicas no tempo, isto é, através da escolha de um resultado a analisar num determinado momento. Alguns desses resultados podem ser: Temperatura durante a solidificação, o Tempo que demora até a peça se encontrar 100% sólida, as primeiras e últimas zonas a solidificar, o Gradiente de temperatura, a Densidade do material, a Taxa de arrefecimento, entre outros. Ver Figura 48.

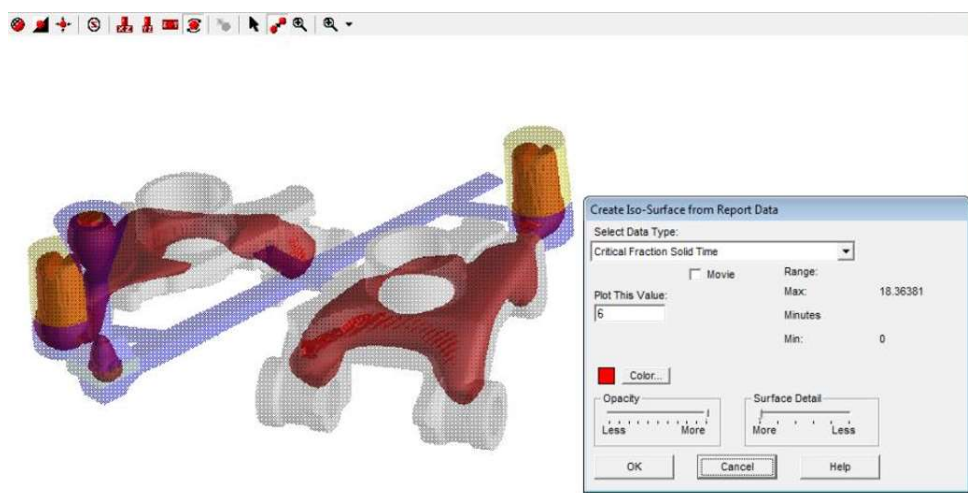


Figura 48 - Imagem exemplificativa de análise de resultados através do *software SolidCast™*

# TRABALHO PRÁTICO

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

3.3 DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA DE ABORDAGEM E RESULTADOS  
OBTIDOS

3.4. ANÁLISE SWOT DOS RESULTADOS OBTIDOS

3.5. IMPLEMENTAÇÃO DE MELHORIAS

3.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS E CONSIDERAÇÕES A  
TOMAR PARA FUTUROS ENSAIOS

### 3.1. Caracterização da empresa

A empresa que acolheu o projeto em questão foi a PR-Metal, Lda. A mesma teve origem na companhia Molcotex – Indústria de moldes e cortantes, Lda., que foi fundada em 1985. Em 2010, sofreu uma mudança na estrutura acionista e, com isso, redefiniu-se um novo foco de produtos para a empresa, na área do fabrico de equipamentos para sobreinjeção de Zamak em cabos de aço e cabos de comando para a indústria automóvel.



Figura 49 - Logótipo da PR-Metal, Lda.

Esta empresa faz parte do Grupo PR, constituído pelas empresas demonstradas na Figura 50.

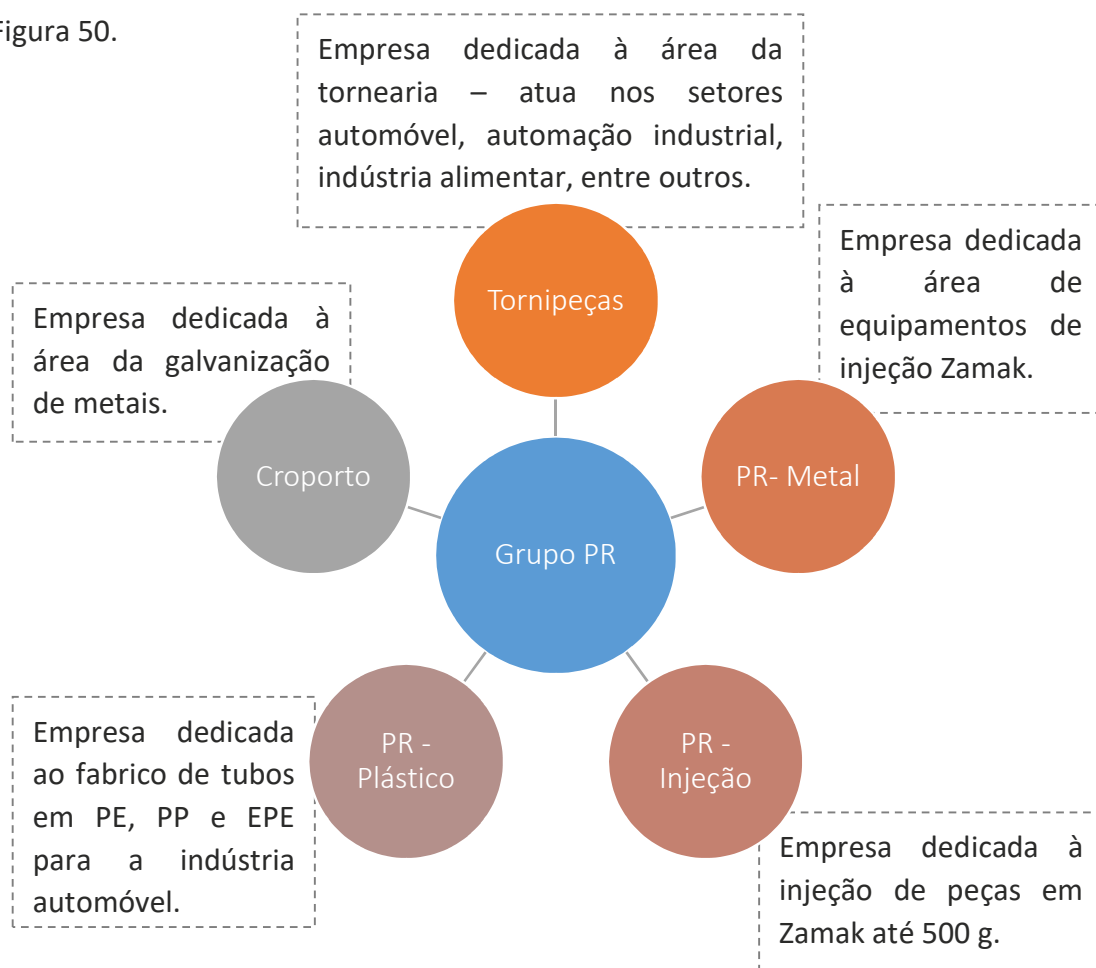


Figura 50 - Conjunto de empresas onde está inserida a PR – Metal, Lda.

### 3.2. Caracterização do problema

É com vista à expansão de novos mercados que a PR Metal resolve enveredar pela área da injeção em Zamak, dentro da qual já produz diversos artigos, maioritariamente em Zamak 5. Para alguns destes artigos, a injeção Zamak constitui apenas um componente do seu todo, como é por exemplo o caso de alguns cabos para a indústria automóvel (ver Figura 51).



Figura 51 - Exemplo de cabo para a indústria automóvel com injeção parcial de Zamak

No entanto, mais recentemente, a empresa entrou no mercado de peças estéticas, também elas em Zamak.

Estas peças exigem um maior rigor no seu fabrico, nomeadamente a nível de controlo do processo e aparência estética, mais do que rigor funcional. Entre elas, a que será abordada neste caso de estudo é uma chapa para os produtos da *Cavalinho®*, mostrada na Figura 52.



Figura 52 - Chapa para mala *Cavalinho®*

Essencialmente, o problema proposto assenta na correção/melhoria do processo de fabrico desta peça, para que o seu aspeto seja o mais favorável possível. Para isso, deverão ser tidas em conta todas as variáveis, desde a máquina (opções da máquina,

forma de construção), passando pela construção do molde, material ou até ao tratamento a que a peça pode estar sujeita após injeção.

Para abordar o problema, será necessário analisar primeiro o processo conforme ele se encontra atualmente, definir as variáveis a abordar, estudar essas variáveis, agir sobre elas e medir os resultados.

A Figura 55 demonstra as datas importantes do projeto, desde a primeira reunião de definição do problema até ao último passo realizado. Como se pode verificar, houve um acompanhamento do projeto começando pela análise do problema, passando pela alteração de variáveis, estudos de simulação e terminando na solução apresentada.



Figura 53 - Evolução do projeto

Pode verificar-se que o primeiro passo após a definição do problema passou por conhecer o método de fabrico utilizado para conceber a peça em questão. A peça da Cavalinho® estava a ser injetada em Zamak 5, através do processo de injeção por câmara quente (falado anteriormente no capítulo 2.2.2 Injeção em câmara quente), numa máquina também ela criada na PR-Metal, a ZM3.

A ZM3 é uma máquina de injeção por câmara quente, ideal para peças de pequenas dimensões e materiais com baixo ponto de fusão, uma vez que o seu mecanismo de injeção está imerso no metal fundido. A máquina ZM3 é apresentada de seguida na Figura 54.



Figura 54 - Máquina de injeção ZM3 e câmara quente de injeção

O sistema de injeção utilizado pela ZM3 encontra-se ilustrado de seguida na Figura 55, bem como o bico de injeção que estava em uso.

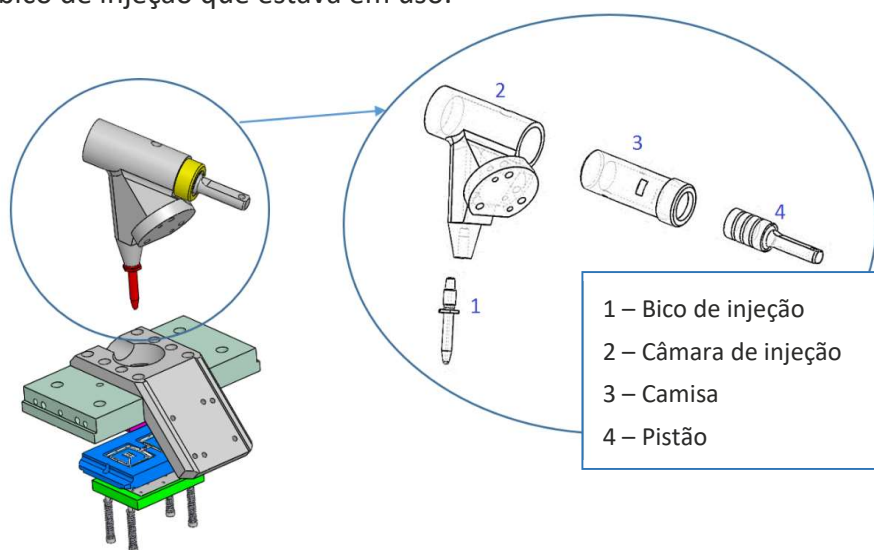


Figura 55 - Sistema de injeção

Como o sistema de injeção está imerso no cadinho com metal fundido, assim que o pistão é puxado atrás, o metal líquido entra para a camisa da câmara de injeção. Assim que o pistão é empurrado para a frente, o metal que se encontra na camisa e na câmara de injeção é forçosamente empurrado para o bico de injeção em direção ao molde. Ver na Figura 56 a direção da injeção do metal fundido no molde.

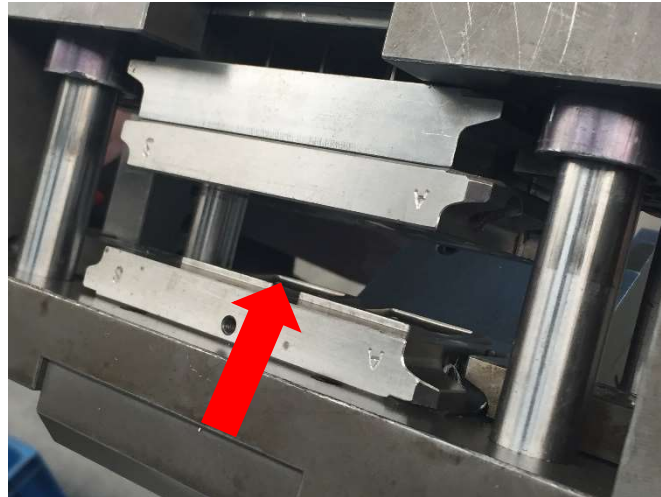


Figura 56 - Direção da injeção do metal fundido

O bico de injeção utilizado tem a configuração mostrada na Figura 57.

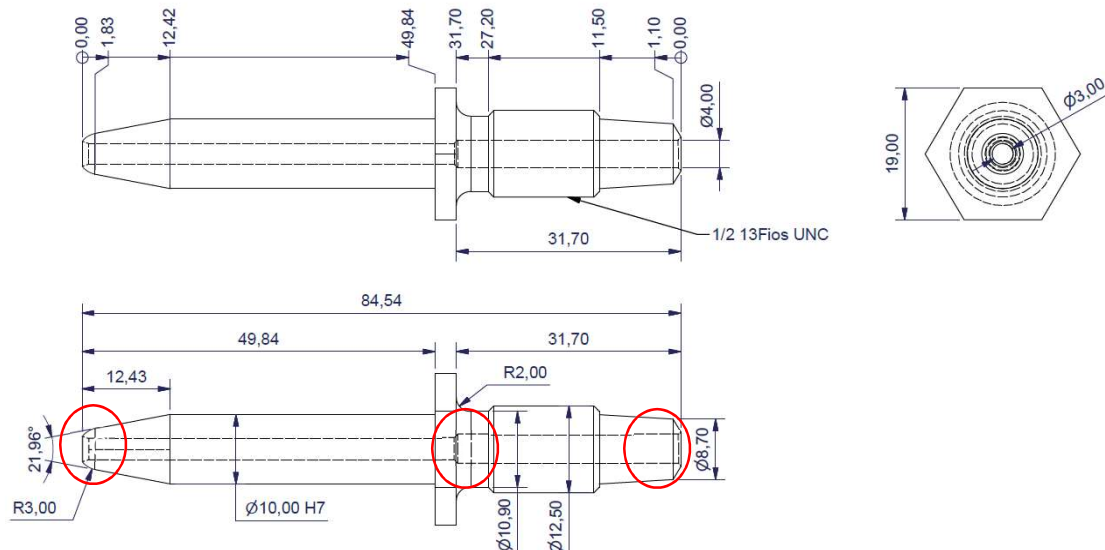


Figura 57 - Geometria e dimensões do bico de injeção utilizado

Verifica-se que, só no bico de injeção, existem três diâmetros de canal diferentes ao longo do mesmo. Isto fará com que o fluxo do material varie ao longo do bico, provocando turbulência indesejada no material.



### 3.2.1. Geometria da peça

A forma da chapa metálica Cavalinho® torna-se complexa pela curvatura que apresenta e pelo facto da sua superfície não poder contemplar qualquer defeito, o que dificulta bastante a sua obtenção por fundição injetada sem posteriores operações de polimento, principalmente no que diz respeito à zona do cavalo e das letras, devido às minuciosas reentrâncias visíveis na Figura 58 e na Figura 59.

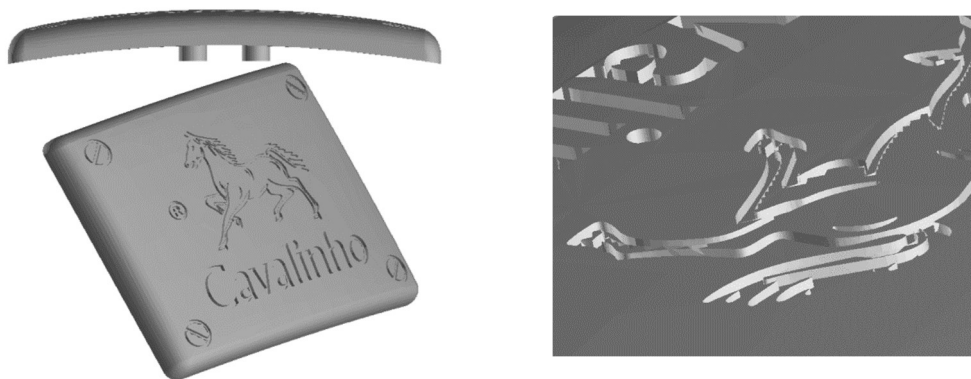


Figura 58 - Modelo 3D da chapa e pormenor do modelo, à direita

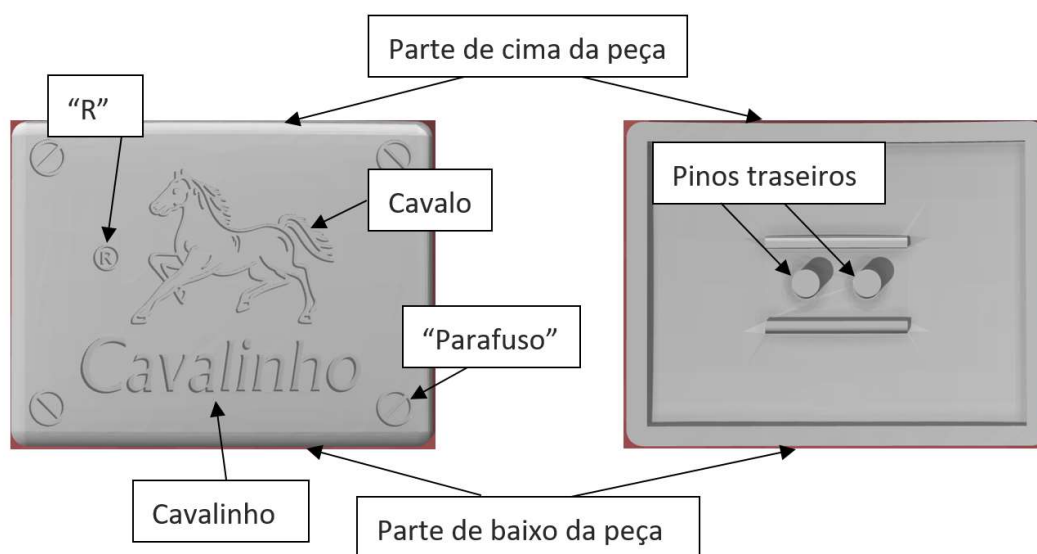


Figura 59 - Legenda das diferentes zonas da peça – à esquerda o lado frontal da peça, à direita o lado traseiro da mesma

Todos os pormenores da peça, desde as reentrâncias até aos pinos por debaixo da mesma, levam a que seja necessária a existência de uma elevada fluidez do material desde que este é injetado até chegar ao seu destino na cavidade. Ao mesmo tempo, a liga deverá solidificar rapidamente, de forma a que o tempo de ciclo por peça não seja elevado, não aumentando o custo da mesma.

### 3.2.2. Metal injetado

O material que estava em utilização era o Zamak 5, e foi com esse material que se realizaram os três primeiros ensaios.

### 3.2.3. Problemas sentidos

Essencialmente, ao nível do material utilizado, os problemas sentidos ao longo de todos os ensaios prenderam-se com o facto de o material não suportar valores de pressão superiores a 0,3 bar. As fissuras que surgiam no centro da zona de injeção da peça, o preenchimento deficiente nos pinos traseiros da mesma, as marcas de fluxo e a turbulência à entrada do material, são defeitos considerados inadmissíveis pelo cliente. No entanto, esses problemas vão ser especificados ao longo da descrição dos ensaios, de forma a ser possível perceber melhor as causas dos mesmos.

## 3.3. Definição da estratégia de abordagem e resultados obtidos

O primeiro ensaio serviu, essencialmente, para perceber o funcionamento de todo o sistema: da máquina (ZM3), do molde e do comportamento do material. Em primeiro lugar, o material no interior do cadinho e no bico de injeção deve estar entre os 410°C e os 430°C, já que abaixo disso a máquina não inicia o processo de injeção, uma vez que a temperatura de solidificação do Zamak ronda os 400°C.

A ZM3 dispõe de capacidade para fazer o controlo da temperatura do molde através de refrigeração, no entanto essa funcionalidade estava desativada aquando dos ensaios realizados. É também possível efetuar a lubrificação do molde automaticamente, se este for desenhado para tal efeito.

Previamente à realização do ensaio, foi realizado um diagrama de *Ishikawa* para análise das causas do problema em questão. Este apresenta-se na Figura 60, de seguida.

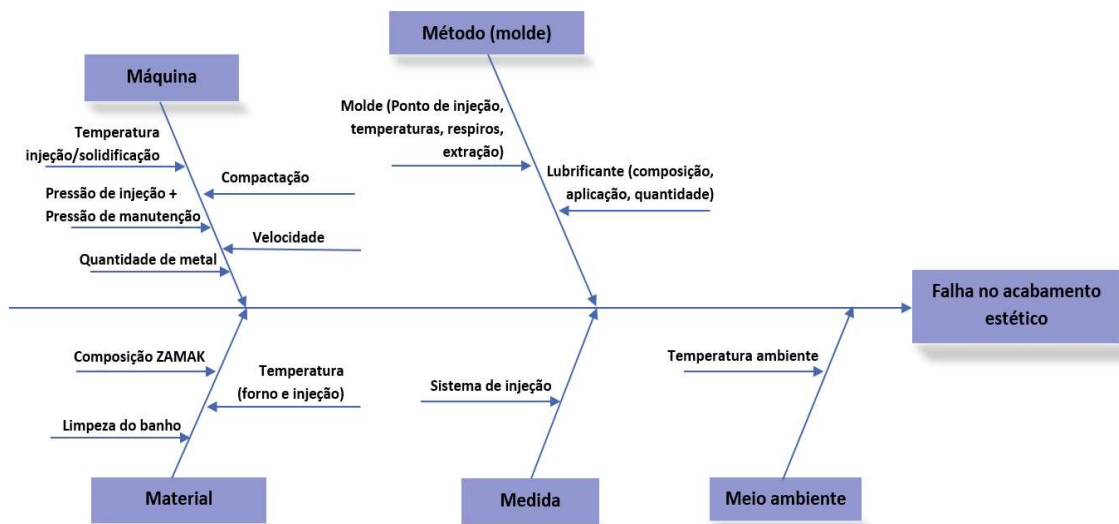


Figura 60 - Diagrama de Ishikawa para análise das causas do problema

Como se pode observar, uma das possíveis causas prende-se com o funcionamento e a parametrização da máquina, portanto, o primeiro ensaio realizado viria a permitir perceber a influência que alguns dos parâmetros provocam no resultado final.

### 3.3.1. Variação dos parâmetros

Nas tabelas de seguida apresentadas (Tabela 7 a 15), está demonstrado o desenrolar do primeiro ensaio, bem como as conclusões tiradas do mesmo.

Os parâmetros regulados foram:

- Pressão de injeção;
- Tempo de enchimento;
- Tempo de arrefecimento;
- Tempo de sopro (tempo em que é soprado ar comprimido para o molde antes deste fechar para iniciar novo ciclo).

#### **Nota:**

Nas legendas de cada tabela, podem ler-se os parâmetros utilizados a cada momento.

Exemplo:

MZ5P4TE03TA05TS0MS – MZ5: Material Zamak 5; P4: Pressão de injeção 4 bar; TE03: Tempo de enchimento 0,3 s; TA05: Tempo de arrefecimento 0,5 s; TS0 – Tempo de sopro 0 s; MS – Molde simples

Tabela 7 - Ensaio A1 - MZ5P4TE03TA05TS0MS

<b>A1</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Pressão de injeção</b>	4	bar
	<b>Tempo de enchimento</b>	0,3	seg
	<b>Tempo de arrefecimento</b>	0,5	seg
	<b>Tempo de sopro</b>	0	seg

Ao nível estético, a peça não cumpre com os critérios de aceitação inicialmente definidos. O aspeto da peça está visivelmente mau, com muitas marcas de fluxo, sulcos e manchas. A peça ficou totalmente preenchida, embora os pinos de encaixe não estejam totalmente perfeitos. Ver Figura 61 abaixo.



Figura 61 - Ensaio A1 - MZ5P4TE03TA05TS0MS – Peça com muitas marcas de fluxo

Tabela 8 - Ensaio A2 - MZ5P05TE02TA05TS0MS

<b>A2</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Pressão de injeção</b>	1	bar
	<b>Tempo de enchimento</b>	0,3	seg
	<b>Tempo de arrefecimento</b>	0,5	seg
	<b>Tempo de sopro</b>	0	seg

Ao diminuir drasticamente a Pressão de injeção, a peça apresenta um aspeto muito mais fluido, mas ainda com muitas marcas de fluxo e turbulência no material. Apresenta também preenchimento deficiente nas zonas assinaladas. Ver Figura 62 de seguida.

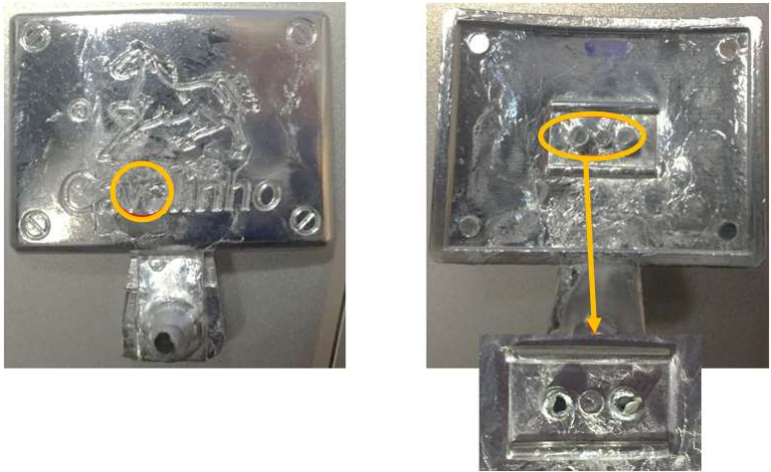


Figura 62 – Ensaio A2 - MZ5P05TE02TA05TS0MS – Peça com preenchimento deficiente e marcas de fluxo

Tabela 9 - Ensaio A3 - Z5P1TE01TA05TS0MS

<b>A3</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	1	bar
	Tempo de enchimento	0,1	seg
	Tempo de arrefecimento	0,5	seg
	Tempo de sopro	0	seg

O Tempo de enchimento escolhido foi demasiado curto, consequentemente não possibilitou a injeção da peça.

Tabela 10 - Ensaio A4 - MZ5P1TE02TA05TS0MS

<b>A4</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	1	bar
	Tempo de enchimento	0,2	seg
	Tempo de arrefecimento	0,5	seg
	Tempo de sopro	0	seg

O Tempo definido não foi suficiente para realizar o enchimento da peça, no entanto, este teste permitiu verificar o fluxo realizado pelo material para o enchimento da peça. Ver Figura 63 abaixo.

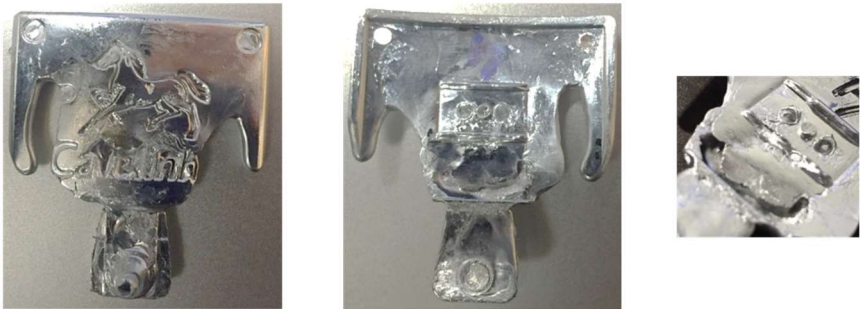


Figura 63 - Ensaio A4 - MZ5P1TE02TA05TS0MS – Peça incompleta com percepção do fluxo de enchimento

Tabela 11 - Ensaio A5 - MZ5P15TE02TA05TS0MS

<b>A5</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	1,5	bar
	Tempo de enchimento	0,2	seg
	Tempo de arrefecimento	0,5	seg
	Tempo de sopro	0	seg

O aumento da pressão de injeção fez com que a peça enchesse um pouco mais, no mesmo tempo. Mas é visível que este aumento de pressão tenha provocado maior turbulência no enchimento da peça, o que, consequentemente, deu origem à formação de poros nas zonas assinaladas na Figura 64.



Figura 64 - Ensaio A5 - MZ5P15TE02TA05TS0MS – Peça incompleta e com poros

Tabela 12 - Ensaio A6 - MZ5P2TE02TA05TS0MS

<b>A6</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	2	bar
	Tempo de enchimento	0,2	seg
	Tempo de arrefecimento	0,5	seg
	Tempo de sopro	0	seg

O aumento da pressão ajudou novamente no enchimento da peça. No entanto, existe preenchimento deficiente nos pinos, atrás, e algumas falhas na superfície da peça. Nota-se ainda, claramente, uma diferença de cores na superfície da peça, nas zonas assinaladas na Figura 65.



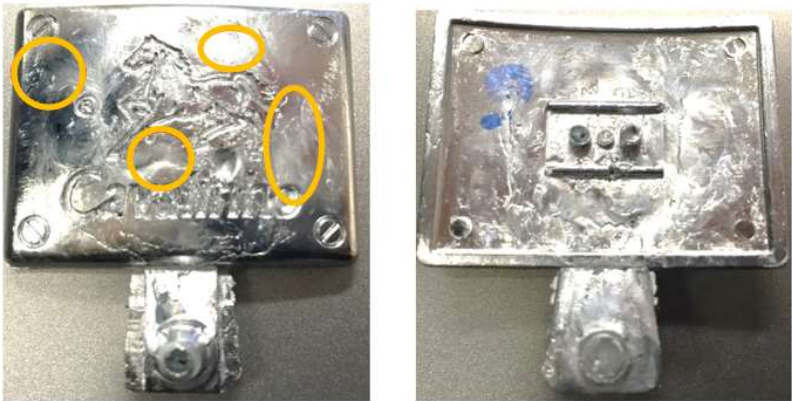


Figura 65 - Ensaio A6 - MZ5P2TE02TA05TS0MS – Peça com manchas e poros

Tabela 13 - Ensaio A7 - MZ5P2TE025TA05TS0MS

<b>A7</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	2	bar
	Tempo de enchimento	0,25	seg
	Tempo de arrefecimento	0,5	seg
	Tempo de sopro	0	seg

Com mais algum tempo de enchimento, a peça ficou praticamente completa, ficando apenas a faltar o fim dos pinos atrás da peça. Verifica-se ainda que as marcas de fluxo aumentaram, surgindo também algumas fissuras na peça (ver zonas assinaladas na Figura 66).



Figura 66 - Ensaio A7 - MZ5P2TE025TA05TS0MS – Peça com poros e fissuras

Tabela 14 - Ensaio A8 - MZ5P1TE1TA1TS0MS

<b>A8</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	1	bar
	Tempo de enchimento	1	seg
	Tempo de arrefecimento	1	seg
	Tempo de sopro	0	seg

Diminuindo a pressão de injeção e aumentando os tempos de enchimento e arrefecimento, denota-se uma melhoria no aspeto da peça, apresentando áreas “limpas”, nomeadamente a nível de marcas de fluxo. Ver Figura 67 abaixo.



Figura 67 – Ensaio A8 - MZ5P1TE1TA1TS0MS – Peça com marcas de fluxo e zonas “limpas”

Tabela 15 - Ensaio A9 - MZ5P15TE02TA05TS0MS

<b>A9</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Pressão de injeção</b>	1,5	bar
	<b>Tempo de enchimento</b>	0,2	seg
	<b>Tempo de arrefecimento</b>	0,5	seg
	<b>Tempo de sopro</b>	0	seg

Ao diminuir a Pressão de injeção (comparativamente com o ensaio A6), verifica-se uma peça mais completa, mas com pior aspeto visual. A única zona da peça com o aspeto pretendido é a que se encontra assinalada. Ver Figura 68 abaixo.



Figura 68 - Ensaio A9 - MZ5P15TE02TA05TS0MS – Peça quase completa, mas com fraca qualidade no aspeto visual



## Conclusões

Relativamente a este primeiro lote de ensaios, as conclusões que se podem retirar são as seguintes:

1. Quanto mais baixa for a pressão, melhor o aspeto visual da peça;
2. O tempo mínimo de enchimento para uma pressão de injeção baixa é de 0,3 s;
3. O fluxo de material faz-se no sentido apresentado na Figura 69:



Figura 69 - Fluxo de enchimento da peça injetada com Zamak 5

### 3.3.2. Variação dos parâmetros e controlo de temperatura do molde

O segundo lote de ensaios realizado permitiu uma melhor análise dos problemas ao nível da injeção. Era objetivo realizar o ensaio já com a possibilidade de regular a temperatura de trabalho no molde. Isto foi parcialmente obtido, utilizando sopro no molde. No entanto, as temperaturas do molde não foram passíveis de medição.

A massa de cada peça foi medida, de forma a perceber também qual a diferença entre as peças realizadas.

De seguida, apresentam-se os resultados, a partir da Tabela 16.

Tabela 16 - Ensaio B1 - MZ5P25TE6TA002TS2MS

<b>B1</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	2,5	bar
	Tempo de enchimento	6	seg
	Tempo de arrefecimento	0,02	seg
	Tempo de sopro	2	seg
	Massa	23,4	g

Ao nível estético a peça está visivelmente má (apesar de melhor relativamente ao primeiro lote de ensaios), com muitas marcas de fluxo devido à turbulência à entrada do material. Apresenta também algumas rebarbas, possíveis de observar na Figura 70, em parte devido ao elevado tempo de enchimento.



Figura 70 - Ensaio B1 - MZ5P25TE6TA002TS2MS – Peça com marcas de fluxo e algumas rebarbas assinaladas

Tabela 17 - Ensaio B2 - MZ5P5TE6TA002TS2MS

<b>B2</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	5	bar
	Tempo de enchimento	6	seg
	Tempo de arrefecimento	0,02	seg
	Tempo de sopro	2	seg
	Massa	24,5/19,9	g

Devido ao aumento da pressão de injeção e ao elevado tempo de injeção, a soldadura que tinha sido realizada no molde para injetar apenas uma cavidade foi ultrapassada e no final obtiveram-se duas peças. A peça obtida é visivelmente pior do que a obtida na 1ª iteração (B1), e a peça obtida pela segunda cavidade é o exemplo de que quanto mais obstáculos existirem à entrada do material, a mais tensões este estará sujeito, causando maior turbulência. Este efeito é visível na Figura 71.



Figura 71 - Ensaio B2 -MZ5P5TE6TA002TS2MS – Pormenor da parede soldada no molde e peça obtida por ação da pressão utilizada, assinalada à esquerda

Tabela 18 - Ensaio B3 - MZ5P1TE6TA002TS2MS

B3	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	1	bar
	Tempo de enchimento	6	seg
	Tempo de arrefecimento	0,02	seg
	Tempo de sopro	2	seg
	Massa	23,3	g

Obteve-se uma peça com um aspeto visual muito mais favorável e mais próxima do resultado pretendido, no entanto, ainda são visíveis alguns defeitos como marcas de fluxo, rebarbas e preenchimento deficiente. Ver Figura 72 abaixo.



Figura 72 - Ensaio B3 - MZ5P1TE6TA002TS2MS – Peça com marcas de fluxo, rebarbas e preenchimento deficiente nos pinos traseiros

Tabela 19 - Ensaio B4 - MZ5P05TE6TA002TS2MS

<b>B4</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	0,5	bar
	Tempo de enchimento	6	seg
	Tempo de arrefecimento	0,02	seg
	Tempo de sopro	2	seg
	Massa	23,3	g

A diminuição da pressão de injeção permitiu um aspeto mais “limpo” na peça, nomeadamente atrás. No entanto, acentuou uma fissura no centro da zona de injeção. De notar que existe preenchimento deficiente nos pinos traseiros, que pode ser observado na Figura 73.

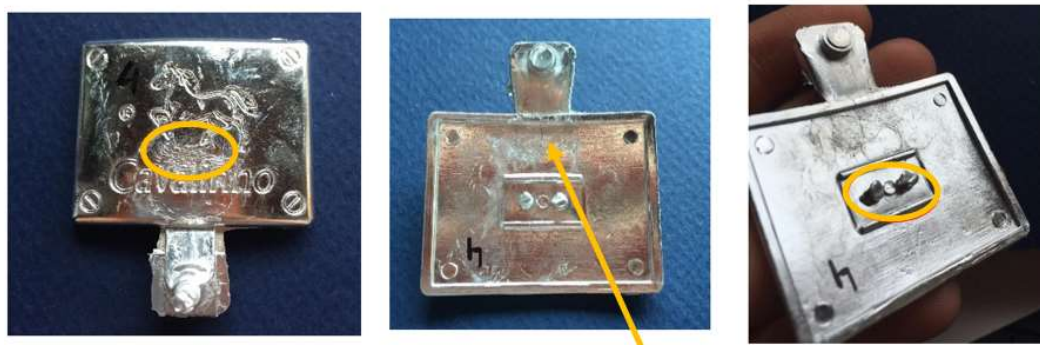


Figura 73 - Ensaio B4 - MZ5P05TE6TA002TS2MS – Peça com fissura acentuada no centro da zona de injeção e preenchimento deficiente nos pins traseiros

Tabela 20 - Ensaio B5 - MZ5P02TE6TA001TS2MS

<b>B5</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	0,2	bar
	Tempo de enchimento	6	seg
	Tempo de arrefecimento	0,01	seg
	Tempo de sopro	2	seg
	Massa	23,1	g

A nova diminuição de pressão melhorou visivelmente o aspeto da peça, o que é visível na Figura 74. A fissura no centro da zona de injeção aumentou e o preenchimento deficiente permaneceu, faltando também algum material na lateral da peça. Nota-se uma melhor distribuição/fluxo do material na parte posterior da peça, comparativamente com a parte dianteira, em parte devido à configuração da peça.



Praticamente não se verifica turbulência na parte central da peça, junto à zona de injeção.

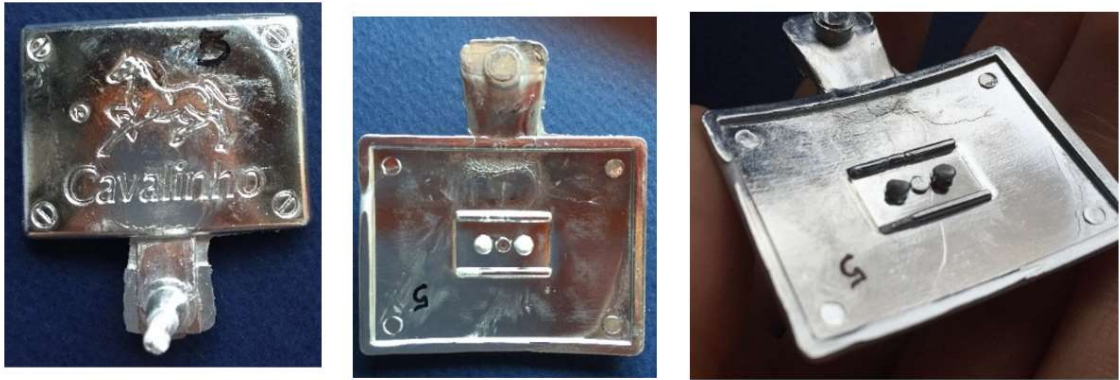


Figura 74 - Ensaio B5 - MZ5P02TE6TA001TS2MS – Peça com aspeto fluido, preenchimento deficiente e fissura central

Tabela 21 - Ensaio B6 - MZ5P03TE6TA001TS2MS

<b>B6</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	0,3	bar
	Tempo de enchimento	6	seg
	Tempo de arrefecimento	0,01	seg
	Tempo de sopro	2	seg
	Massa	23,1	g

Denota-se uma tendência na fissura central para o lado assinalado na Figura 78. Com este ligeiro aumento de pressão, verifica-se o aparecimento de rebarbas. Também nesta peça não se verifica muita turbulência no fluxo do material. Ver Figura 75 e 78.



Figura 75 - Ensaio B6 - MZ5P03TE6TA001TS2MS – Peça com fissura central

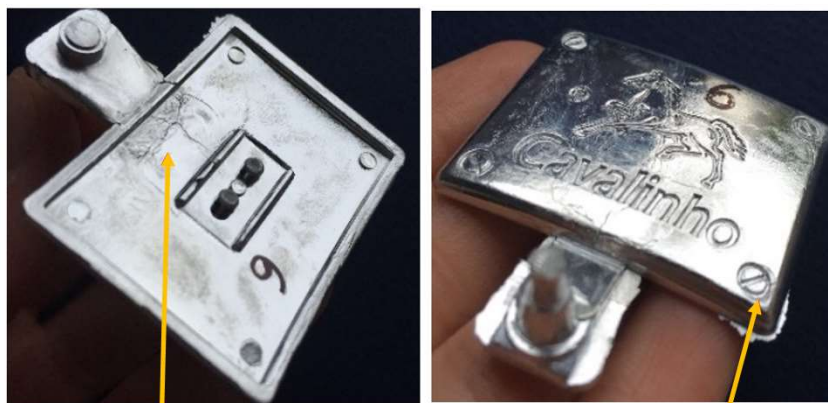


Figura 76 - Ensaio B6 - MZ5P03TE6TA001TS2MS – Peça fissura central acentuada e rebarbas

Tabela 22 - Ensaio B7 - MZ5P03TE6TA005TS2MS

**B7**

Parâmetros	Valor	Unidade
Pressão de injeção	0,3	bar
Tempo de enchimento	6	seg
Tempo de arrefecimento	0,05	seg
Tempo de sopro	2	seg
Massa	23,1	g

Novamente não se verifica muita turbulência junto à área de injeção do material (Figura 77). No entanto, nota-se a fissura central também muito acentuada, rebarbas e preenchimento deficiente nos pinos traseiros. Comparativamente com a iteração anterior, verificam-se mais fissuras na zona das letras.

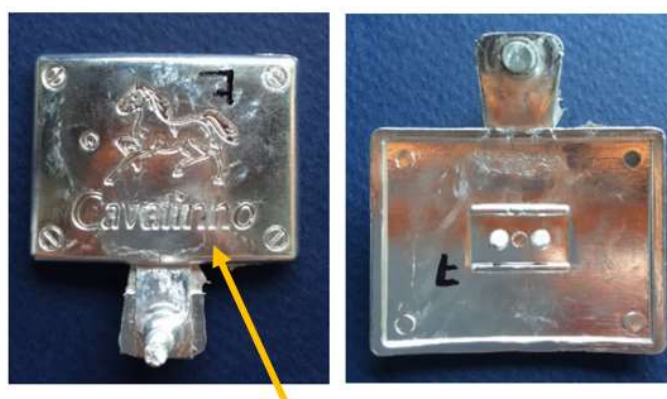


Figura 77 - Ensaio B7 - MZ5P03TE6TA005TS2MS – Peça com fissura central assinalada e fissuras na zona das letras

Tabela 23 - Ensaio B8 - MZ5P03TE6TA003TS2MS

<b>B8</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	0,3	bar
	Tempo de enchimento	6	seg
	Tempo de arrefecimento	0,03	seg
	Tempo de sopro	2	seg
	Massa	23,1	g

Os resultados foram muito semelhantes à peça B7 deste ensaio, com a agravante de apresentar preenchimento deficiente na zona de injeção. Na Figura 78, nota-se o aparecimento de manchas na superfície da peça.



Figura 78 - Ensaio B8 - MZ5P03TE6TA003TS2MS – Peça com preenchimento deficiente assinalada na zona de injeção, aparecimento de manchas visíveis na 2ª fotografia da esquerda para a direita

Tabela 24 - Ensaio B9 - MZ5P03TE10TA001TS2MS

<b>B9</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	0,3	bar
	Tempo de enchimento	10	seg
	Tempo de arrefecimento	0,01	seg
	Tempo de sopro	2	seg
	Massa	23,2	g

Com as condições apresentadas na Tabela 24, nota-se uma fissura central agravada. O preenchimento deficiente nos pinos traseiros persiste e surgem manchas na parte de trás da peça (ver Figura 79), provavelmente devido ao curto Tempo de arrefecimento. Surge também preenchimento deficiente na marca do “parafuso” superior à esquerda.



Figura 79 - Ensaio B9 - MZ5P03TE10TA001TS2MS – Peça com manchas “baças” e preenchimento deficiente em alguns pontos assinalados

Tabela 25 - Ensaio B10 - MZ5P03TE5TA001TS2MS

<b>B10</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	0,3	bar
	Tempo de enchimento	5	seg
	Tempo de arrefecimento	0,01	seg
	Tempo de sopro	2	seg
	Massa	23,1	g

Com base nestes parâmetros, verifica-se, através da Figura 80, um preenchimento deficiente, com maior destaque na parte traseira, no que toca ao enchimento da peça, em muito devido ao curto Tempo de enchimento. Verificam-se também algumas marcas de fluxo na zona das letras e preenchimento deficiente no mesmo “parafuso” da teração anterior, no canto superior esquerdo.



Figura 80 - Ensaio B10 - MZ5P03TE5TA001TS2MS – Peça com preenchimento deficiente acentuada na zona da injeção do material

Tabela 26 - Ensaio B11 - MZ5P06TE5TA001TS2MS

<b>B11</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	0,6	bar
	Tempo de enchimento	5	seg
	Tempo de arrefecimento	0,01	seg
	Tempo de sopro	2	seg
	Massa	23,2	g

Aumentando a pressão de injeção, observa-se um evidente aumento da turbulência na entrada do material. Não se verifica preenchimento deficiente na zona traseira da peça (pinos) e não é visível a fissura central na zona de injeção. Ver Figura 81.





Figura 81 - Ensaio B11 - MZ5P06TE5TA001TS2MS – Peça com marcas de fluxo e turbulência na zona de injeção

Tabela 27 - Ensaio B12 - MZ5P04TE5TA001TS2MS

<b>B12</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	0,4	bar
	Tempo de enchimento	5	seg
	Tempo de arrefecimento	0,01	seg
	Tempo de sopro	2	seg
	Massa	23,0	g

Com estes parâmetros, aparece novamente a fissura na zona central, bastante acentuada, mas as marcas de fluxo estão menos notórias, bem como a turbulência. Persiste o preenchimento deficiente nos pinos, visível na Figura 82.



Figura 82 - Ensaio B12 - MZ5P04TE5TA001TS2MS – Peça com fissura acentuada na zona de injeção e preenchimento deficiente nos pinos traseiros pormenor da fissura no centro da zona de injeção à direita

Tabela 28 - Ensaio B13 - MZ5P05TE5TA001TS2MS

**B13**

Parâmetros	Valor	Unidade
Pressão de injeção	0,5	bar
Tempo de enchimento	5	seg
Tempo de arrefecimento	0,01	seg
Tempo de sopro	2	seg
Massa	23,2	g

Nestas condições não surge a fissura central na zona de injeção da peça, mas as marcas de fluxo e a turbulência voltam a acentuar-se. O preenchimento deficiente nos pinos traseiros acentuou-se, como se pode observar na Figura 83.



Figura 83 - Ensaio B13 - MZ5P05TE5TA001TS2MS – Peça com preenchimento deficiente acentuada nos pinos

### Conclusões sobre o segundo lote de ensaios

Relativamente ao segundo lote de ensaios, os dados que se podem retirar são os seguintes:

- Para que não exista tanta turbulência e fluxo de material na zona da injeção, a Pressão de injeção deve situar-se entre 0,2 e 0,4 bar;
- Se o Tempo de enchimento for inferior a 5 s, as “manchas” à superfície da peça podem ser evitadas;
- Alguns problemas comuns:
  - i. Preenchimento deficiente nos pinos traseiros, exemplo na Figura 86;



Figura 84 - Exemplo de preenchimento deficiente nos pinos traseiros

- ii. Marcas de fluxo, exemplo na Figura 87;



Figura 85 - Exemplo de marcas de fluxo

- iii. Preenchimento deficiente na zona da injeção (parte de trás), exemplo na Figura 88;



Figura 86 - Exemplo de preenchimento deficiente na zona de injeção

- iv. Turbulência do material (junto à zona das letras), exemplo na Figura 89;



Figura 87 - Exemplo de turbulência na zona das letras

- v. Fissura central, exemplo na Figura 90;

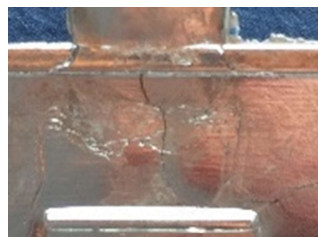


Figura 88 - Exemplo de fissura central

- vi. Marca de fluxo na lateral da peça, exemplo na Figura 91.

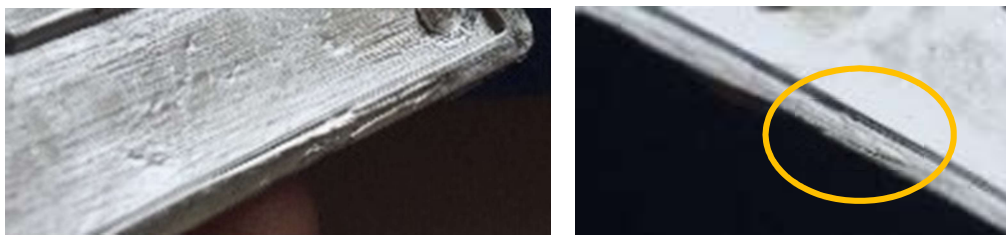


Figura 89 - Exemplo de marca de fluxo na lateral da peça

### 3.3.3. Teste bomba de Zamak

O terceiro lote de ensaios realizado permitiu comparar os resultados anteriormente obtidos com novos resultados que se iriam obter, realizando o ensaio com uma outra bomba de Zamak. A bomba utilizada até agora apresentava um diâmetro de  $\varnothing 40,10$  mm, refletido na Figura 90 abaixo, e a bomba utilizada neste ensaio foi de  $\varnothing 19$  mm.

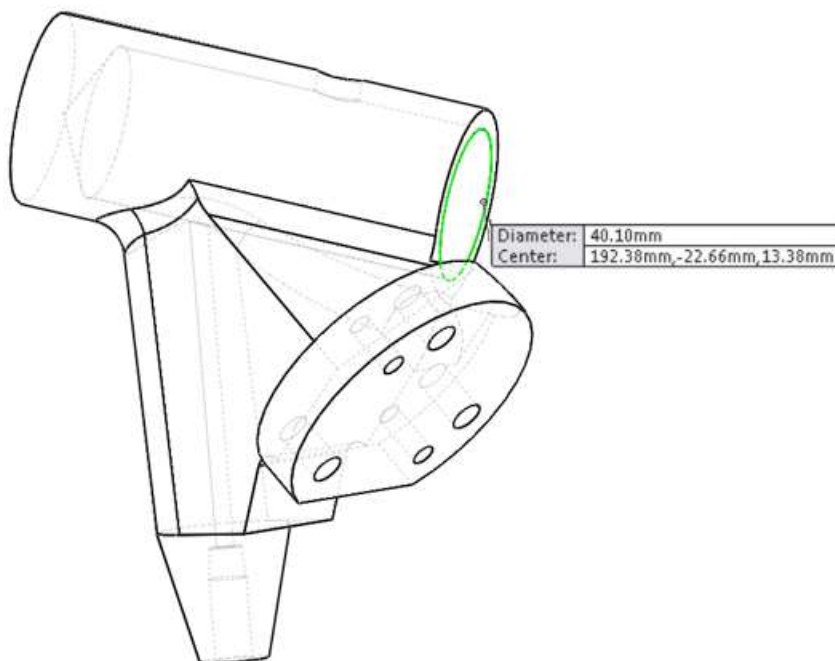


Figura 90 - Diâmetro interno da bomba anteriormente utilizada ( $\varnothing 40,10$  mm)

Este ensaio foi realizado à semelhança do ensaio anterior de controlo de temperatura no molde, utilizando os mesmos parâmetros de injeção. No entanto, dado que os resultados foram em muito semelhantes ao anterior, e o objetivo foi apenas comparar o uso das bombas, os mesmos não foram registados por meio fotográfico.

Uma vez que as diferenças, relativamente ao ensaio anterior, não foram significativas (ver Figura 91), conclui-se que o diâmetro da bomba não é fator determinante no resultado obtido. Desta forma, irá voltar a utilizar-se a bomba inicial.



Figura 91 - Peças exemplo do terceiro ensaio com Zamak 5 e bomba de 19 mm

Atendendo a que alguns aspetos inicialmente considerados como possíveis fontes de problemas mostraram não ter qualquer efeito no aparecimento de defeitos, tal como o funcionamento da máquina, a bomba e os parâmetros de fabrico, é hora de estudar um outro aspeto: o material. Assim sendo, foi realizado um estudo ao tipo de material utilizado. As conclusões apresentam-se de seguida.

#### 3.3.4. Substituição do metal utilizado

Relembrando alguma da informação que já foi referida no capítulo anterior (Revisão bibliográfica), podem agora comparar-se alguns dados, de forma a perceber melhor o comportamento do material durante a injeção. As comparações vão ser feitas essencialmente com o Zamak 3, uma vez que esta é a liga de uso mais frequente para moldes de injeção por câmara quente.

Sabe-se já que o Zamak 5 se diferencia essencialmente pela presença de cobre na liga (como se pode observar na Tabela 29), tornando-a mais resistente.

Tabela 29 - Comparação entre Zamak 3 e Zamak 5

Elementos constituintes	Zamak 3	Zamak 5
<b>Alumínio, Al</b>	3,5 – 4,3 %	3,5 – 4,3 %
	3,9 – 4,3 %	3,9 – 4,3 %
<b>Cádmio, Cd</b>	<= 0,0030 %	<= 0,0030 %
	<= 0,0040 %	<= 0,0040 %
<b>Cobre, Cu</b>	<= 0,10 %	0,75 – 1,25 %
	<= 0,25 %	0,75 – 1,25 %
<b>Ferro, Fe</b>	<= 0,075 %	<= 0,075 %
	<= 0,10 %	<= 0,10 %
<b>Chumbo, Pb</b>	<= 0,0040 %	<= 0,0040 %
	<= 0,0050 %	<= 0,0050 %
<b>Magnésio, Mg</b>	0,020 – 0,050 %	0,030 – 0,060 %
	0,025 – 0,050 %	0,030 – 0,080 %
<b>Estanho, Sn</b>	<= 0,0020 %	<= 0,0020 %
	<= 0,0030 %	<= 0,0030 %
<b>Zinco, Zn</b>	95,466 – 96,075 %	94,306 – 95,32 %
	95,288 – 96,48 %	94,258 – 95,72 %

No entanto, como já foi estudado anteriormente, sabe-se que esta capacidade de resistência mecânica do Zamak 5 provoca uma menor flexibilidade do material. A baixa flexibilidade do material pode levar ao aumento de fissuras e turbulência do material em zonas do molde com reentrâncias.

Tendo em conta o tipo de peça em causa, em que o seu aspeto exterior é mais importante do que propriamente a sua função, o facto do Zamak 5 ser mais resistente do que o Zamak 3 não tem influência na função final da peça.

Sabe-se ainda que o Zamak 5 é ideal para peças de maiores dimensões, enquanto o Zamak 3 é mais aconselhado em peças de menores dimensões e de maior rigor dimensional, com curvaturas, reentrâncias e dobras.

Foi com base nos pressupostos acima referidos que se determinou avançar para um lote de ensaios com Zamak 3.



### 3.3.5. Ensaio de novas condições: Alteração do material para Zamak 3

Este ensaio permitiu estudar o comportamento do material comparativamente com o Zamak 5. De seguida, vão ser apresentados os resultados de cada iteração realizada (Tabela 30 a ), verificando-se uma maior fluidez no material, comparativamente com o Zamak 5.

A nomenclatura na legenda de cada tabela passa a ter o seguinte significado:

MZ3P05TE6TA005TS05MS – MZ3: Material Zamak 3; P05: Pressão de injeção 0,5 bar; TE6: Tempo de enchimento 6 s; TA005: Tempo de arrefecimento 0,05 s; TS05 – Tempo de sopro 0,5 s; MS – Molde simples.

Tabela 30 - Ensaio C1 - MZ3P05TE6TA005TS05MS

<b>C1 e C2</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Pressão de injeção</b>	0,5	bar
	<b>Tempo de enchimento</b>	6	seg
	<b>Tempo de arrefecimento</b>	0,05	seg
	<b>Tempo de sopro</b>	0,5	seg

Melhoria notável no aspeto geral da peça, visível na Figura 92, comparativamente com as peças em Zamak 5. Com os parâmetros utilizados, verifica-se a existência de uma fissura central na zona de injeção da peça, constata-se qual o fluxo do material na parte de trás da peça e preenchimento deficiente nos pinos.



Figura 92 - Ensaio C1 - MZ3P05TE6TA005TS05MS – Peças com fissura central

Tabela 31 - Ensaio C3 - MZ3P1TE6TA005TS05MS

**C3**

Parâmetros	Valor	Unidade
Pressão de injeção	1	bar
Tempo de enchimento	6	seg
Tempo de arrefecimento	0,05	seg
Tempo de sopro	0,5	seg

O aumento de pressão de injeção mostrou o resultado esperado: pior aspeto e maior turbulência no material. Também se verificou preenchimento deficiente nos pinos traseiros. Ver Figura 93 abaixo.



Figura 93 - Ensaio C3 - MZ3P05TE6TA005TS05MS – Peça com maior turbulência no material

Tabela 32 - Ensaio C4 - MZ3P25TE6TA005TS05MS

**C4**

Parâmetros	Valor	Unidade
Pressão de injeção	2,5	bar
Tempo de enchimento	6	seg
Tempo de arrefecimento	0,05	seg
Tempo de sopro	0,5	seg

Novamente, o aumento exagerado da pressão de injeção influencia negativamente os resultados obtidos no aspeto visual da peça, tal como se pode verificar na Figura 94.



Figura 94 - Ensaio C4 - MZ3P05TE6TA005TS05MS – Peça com mau aspeto visual



Tabela 33 – Ensaio C5 - MZ3P05TE3TA005TS05MS

<b>C5</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Pressão de injeção</b>	0,5	bar
	<b>Tempo de enchimento</b>	3	seg
	<b>Tempo de arrefecimento</b>	0,05	seg
	<b>Tempo de sopro</b>	0,5	seg

Nesta iteração a redução de pressão de injeção e a diminuição do tempo de enchimento provocaram um melhor aspeto em algumas zonas da peça. Verificou-se igualmente o agravamento de fissuras na zona de injeção. Notam-se também algumas marcas de fluxo, e preenchimento deficiente nos pinos traseiros. Ver Figura 95.



Figura 95 - Ensaio C5 - MZ3P05TE6TA005TS05MS – Peça com fissuras e marcas de fluxo

Tabela 34 - Ensaio C6 - MZ3P02TE6TA005TS05MS

<b>C6</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Pressão de injeção</b>	0,2	bar
	<b>Tempo de enchimento</b>	6	seg
	<b>Tempo de arrefecimento</b>	0,05	seg
	<b>Tempo de sopro</b>	0,5	seg

Neste caso, se se estudarem os resultados comparativamente com a 1ª e a 2ª peças obtidas neste ensaio (C1 e C2), verifica-se que a pressão de injeção escolhida não foi suficiente para “moldar” o material (ver Figura 96), dado que existe preenchimento deficiente em dois sítios diferentes. Não existem fissuras e o material chegou a praticamente toda a cavidade (exceto à totalidade dos pinos), mas o aspeto da peça está totalmente fora do pretendido.



Figura 96 - Ensaio C6 - MZ3P05TE6TA005TS05MS – Peça com fraco aspeto visual e com preenchimento deficiente em dois sítios distintos

Tabela 35 - Ensaio C7 - MZ3P01TE6TA005TS05MS

**C7**

Parâmetros	Valor	Unidade
Pressão de injeção	0,1	bar
Tempo de enchimento	6	seg
Tempo de arrefecimento	0,05	seg
Tempo de sopro	0,5	seg

Nestas condições a peça obteve um aspeto bastante mais “limpo”, quase como o resultado pretendido. No entanto, verifica-se preenchimento deficiente nos pinos traseiros e junto a uma das fissuras (que surgiram na superfície da peça, e que se podem observar na Figura 97).



Figura 97 - Ensaio C7 - MZ3P05TE6TA005TS05MS – Peça com novas fissuras na linha de união de material, assinaladas na imagem

Tabela 36 - Ensaio C8 - MZ3P01TE4TA005TS05MS

<b>C8</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Pressão de injeção</b>	0,1	bar
	<b>Tempo de enchimento</b>	4	seg
	<b>Tempo de arrefecimento</b>	0,05	seg
	<b>Tempo de sopro</b>	0,5	seg

A diminuição do tempo de enchimento fez com que, com a mesma pressão de injeção, apesar de possuir um bom aspeto visual, a peça não enchesse totalmente a cavidade. Ver Figura 98.



Figura 98 - Ensaio C8 - MZ3P05TE6TA005TS05MS – Peça incompleta e onde é possível observar um fluxo de enchimento diferente do obtido com Zamak 5

Tabela 37 - Ensaio C9 - MZ3P02TE8TA005TS05MS

<b>C9</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Pressão de injeção</b>	0,2	bar
	<b>Tempo de enchimento</b>	8	seg
	<b>Tempo de arrefecimento</b>	0,05	seg
	<b>Tempo de sopro</b>	0,5	seg

Nesta iteração, apesar de se ter aumentado o Tempo de enchimento e aumentado também ligeiramente a pressão de injeção, não foi possível preencher toda a cavidade. Notam-se marcas de fluxo mais acentuadas, mas ainda com bom aspeto. A falta de preenchimento da cavidade deve-se ao facto do tempo de injeção ter sido tão elevado que o material foi arrefecendo antes mesmo de chegar a toda a cavidade. Através da Figura 99 é facilmente perceptível o fluxo do material na peça durante a injeção.

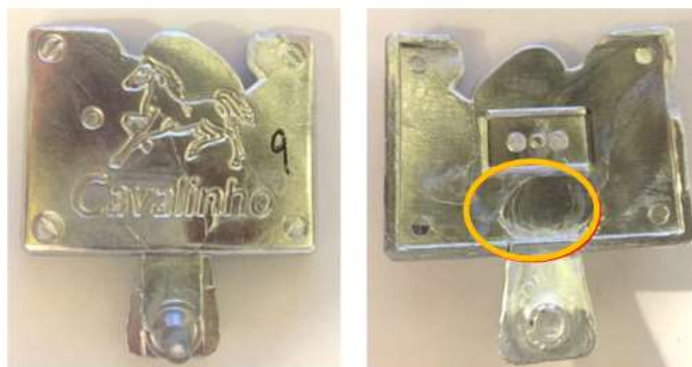


Figura 99 - Ensaio C9 - MZ3P05TE6TA005TS05MS – Peça incompleta e com marcas de fluxo

Tabela 38 - Ensaio C10 - MZ3P02TE4TA8TS05MS

<b>C10</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Pressão de injeção</b>	0,2	bar
	<b>Tempo de enchimento</b>	4	seg
	<b>Tempo de arrefecimento</b>	8	seg
	<b>Tempo de sopro</b>	0,5	seg

Aqui, como o tempo de injeção já foi mais reduzido, o material foi forçado a chegar a praticamente toda a cavidade. No entanto, verificam-se fissuras, realçadas na Figura 100, provavelmente devido ao elevado tempo de arrefecimento.

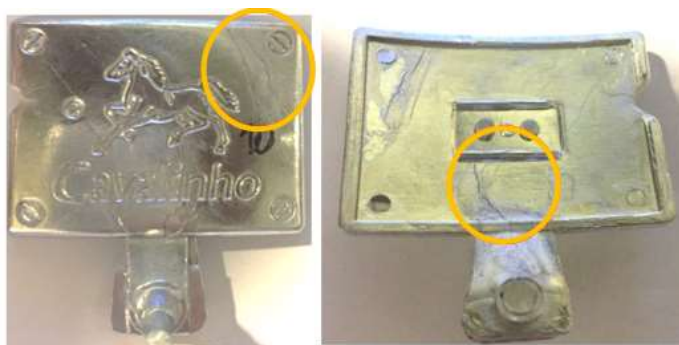


Figura 100 - Ensaio C10 - MZ3P05TE6TA005TS05MS – Peça com fissuras e preenchimento deficiente

Tabela 39 - Ensaio C11 - MZ3P03TE8TA1TS05MS

<b>C11</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Pressão de injeção</b>	0,3	bar
	<b>Tempo de enchimento</b>	8	seg
	<b>Tempo de arrefecimento</b>	0,05	seg
	<b>Tempo de sopro</b>	0,5	seg

Neste caso, apesar do Tempo de enchimento ser bastante elevado, o material fluíu para toda a cavidade, uma vez que a Pressão de injeção também foi mais elevada. O aspeto visual piorou, mas permaneceram fissuras, apesar da diminuição do tempo de arrefecimento, o que comprova que a fissura pode ser causada pelo tempo da peça no molde, e não propriamente por se tratar de tempo de arrefecimento. Ver Figura 101.



Figura 101 - Ensaio C11 - MZ3P05TE6TA005TS05MS – Peça com fissuras

Com base neste ensaio é então possível comprovar que o fluxo do Zamak 3 na cavidade é diferente do fluxo do Zamak 5. Observa-se ainda que o efeito do arrefecimento é nulo, uma vez que não existe uma causa-efeito para as suas alterações. Nesse sentido, deixará de ser considerado como um parâmetro de ensaio.

### 3.3.6. Simulações *SolidCast™*

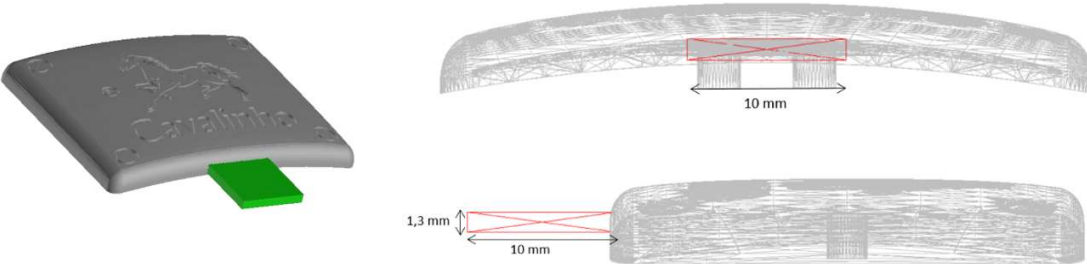
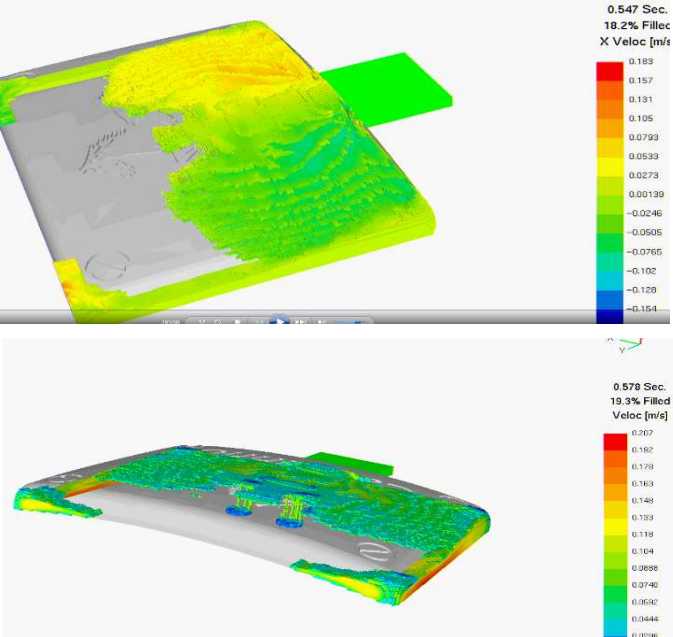
A par com os ensaios realizados, foram sendo realizadas diversas simulações em *SolidCast™* para o estudo do comportamento do material e para a procura de novas soluções de injeção.

Em todas as simulações foi utilizado o Zamak 3, uma vez que o Zamak 5 não existe na base de dados *SolidCast™*. A utilização do Zamak 5 poderia levar a resultados diferentes de simulação devido aos seus constituintes, nomeadamente o Cobre.

De seguida serão descritas as simulações realizadas com os respetivos parâmetros utilizados e conclusões.

A primeira simulação consiste na geometria real das cavidades do molde à data da sua realização. Está demonstrada na Tabela 40, onde se pode verificar a geometria da peça e o seu canal de injeção com as respetivas dimensões, os parâmetros utilizados na simulação e os resultados de enchimento simulado. Esta simulação serve, essencialmente, para perceber qual o comportamento expectável com as condições atuais, e se os resultados da simulação podem ser comparáveis aos reais obtidos.

Tabela 40 - Simulação em FlowCast - Hipótese 1

Hipótese 1 – Cavalinho 7	
Peça e dimensões utilizadas	
	
Parâmetros	Resultados
Material do molde ----- Aço	
Material ----- Zamak 3	
Coefficiente externo de transferência de calor----- 1,50 %	
Material de fundição/ Material do alimentador----- 100 %	
Ambiente/Material de fundição ----- 10 %	
Aço/Material de fundição ----- 50 %	
Grafite/Material de fundição – 0 %	
Material do alimentador/Ambiente ----- 10%	
Material do alimentador/Aço -- 50 %	
Material do alimentador/Grafite ----- 0 %	
Ambiente/Aço ----- 10 %	
Ambiente/Grafite ----- 0 %	
Aço/Grafite ----- 0 %	
Temperatura Ambiente ----- 30 °C	
Tempo de vazamento ----- 3 s	

Logo nesta primeira simulação foi possível perceber que o fluxo do material apresentado é em tudo semelhante ao fluxo percebido aquando da injeção do Zamak 3. Confirma-se que o fluxo difere bastante quando comparado ao do Zamak 5. Enquanto no Zamak 5 a



última parte a encher são os cantos inferiores, no Zamak 3 verifica-se, tanto na simulação como na realidade, que a última zona a receber o material é a parte superior da peça. Essa comparação pode ser observada na Figura 102.



Figura 102 - Comparação entre o fluxo de enchimento da peça com Zamak 5 (à esquerda) e Zamak 3 (à direita)

A segunda simulação, apresentada na Tabela 41, teve como objetivo perceber o fluxo de material colocando a entrada do Zamak pela lateral da peça.

Tabela 41 - Simulação em FlowCast - Hipótese 2

Hipótese 2 - Cavalinho 8	
Peça e dimensões utilizadas	
Parâmetros	Resultados
Material do molde -----	Aço
Material -----	Zamak 3
Coeficiente externo de transferência de calor-----	1,50 %
Material de fundição/ Material do alimentador-----	100 %
Ambiente/Material de fundição -----	10 %
Aço/Material de fundição -----	50 %
Grafite/Material de fundição –	0 %
Material do alimentador/Ambiente -----	10%
Material do alimentador/Aço -	50 %
Material do alimentador/Grafite -----	0 %
Ambiente/Aço -----	10 %
Ambiente/Grafite -----	0 %
Aço/Grafite -----	0 %
Temperatura Ambiente -----	30 °C
Tempo de vazamento -----	3 s

Nesta hipótese, o material irá unir-se no centro da peça, o que por si só será bastante negativo para o resultado final da peça, já que:

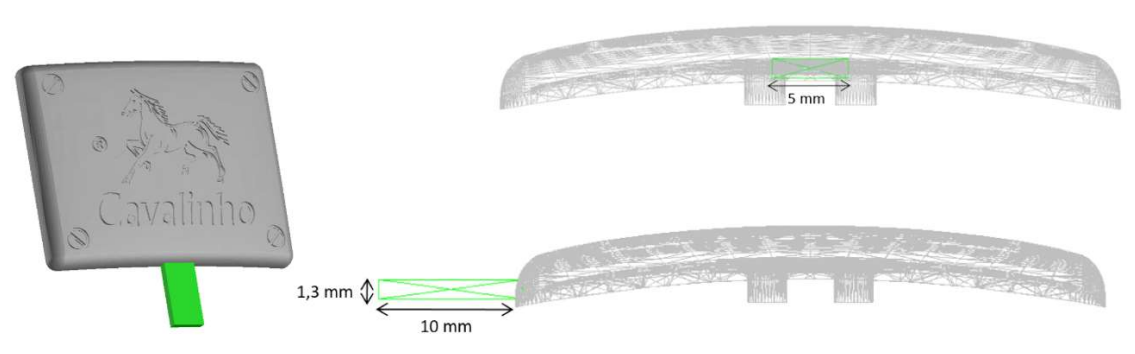
1º - irá causar mais marcas de fluxo e maior turbulência no material; e

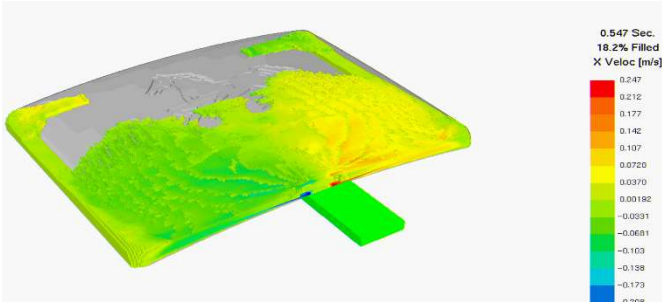
2º - sendo que a última parte a encher irá arrefecer mais rapidamente a chegar à cavidade, esta zona ficará com mais marcas de diferenças de temperatura e a fluidez não será a necessária para produzir o pormenor das reentrâncias, porque ao arrefecer o material, este vai solidificando. Também o facto da peça ser côncava e não reta, faz com que esta não seja uma boa opção, já que o material apresenta maior dificuldade em se distribuir.

Na simulação apresentada na Tabela 42 optou-se por utilizar a mesma zona de injeção da 1ª simulação (Hipótese 1), no entanto, o canal de injeção tem uma largura menor. Com isto pretendia-se que o material fosse injetado com maior velocidade, uma vez que a pressão seria mantida face à primeira hipótese, e o espaço para entrada diminuído. Uma velocidade mais elevada poderia permitir que o fluxo de injeção alterasse, injetando primeiro toda a zona central da peça.



Tabela 42 - Simulação em FlowCast - Hipótese 3

Hipótese 3 – Cavalinho 9	
Peça e dimensões utilizadas	
	
Parâmetros	Resultados
Material do molde -----	Aço
Material -----	Zamak 3
Coeficiente externo de transferência de calor-----	1,50 %
Material de fundição/ Material do alimentador-----	100 %
Ambiente/Material de fundição -----	10 %
Aço/Material de fundição -----	50 %
Grafite/Material de fundição –	0 %
Material do alimentador/Ambiente -----	10%
Material do alimentador/Aço -	50 %
Material do alimentador/Grafite -----	0 %
Ambiente/Aço -----	10 %
Ambiente/Grafite -----	0 %
Aço/Grafite -----	0 %
Temperatura Ambiente -----	30 °C
Tempo de vazamento -----	3 s



Ao se comparar esta simulação com a primeira (versão atual do molde), verifica-se que nesta existe maior probabilidade de mau resultado no aspeto final da peça pelo facto de a distribuição do material ser feita com o fluxo já conhecido e estar sujeita a velocidades maiores (ao diminuir a secção de entrada, a velocidade do material irá aumentar – recordar que, enquanto fundido, o Zamak comporta-se como um fluido).

Como se verifica nas imagens seguintes, para o mesmo momento da injeção, a atual hipótese apresentada (Figura 103) mostra uma maior velocidade máxima de injeção - 0,247 m/s - do que na Hipótese 1, apresentada primeiramente - 0,182 m/s - (Figura 104).

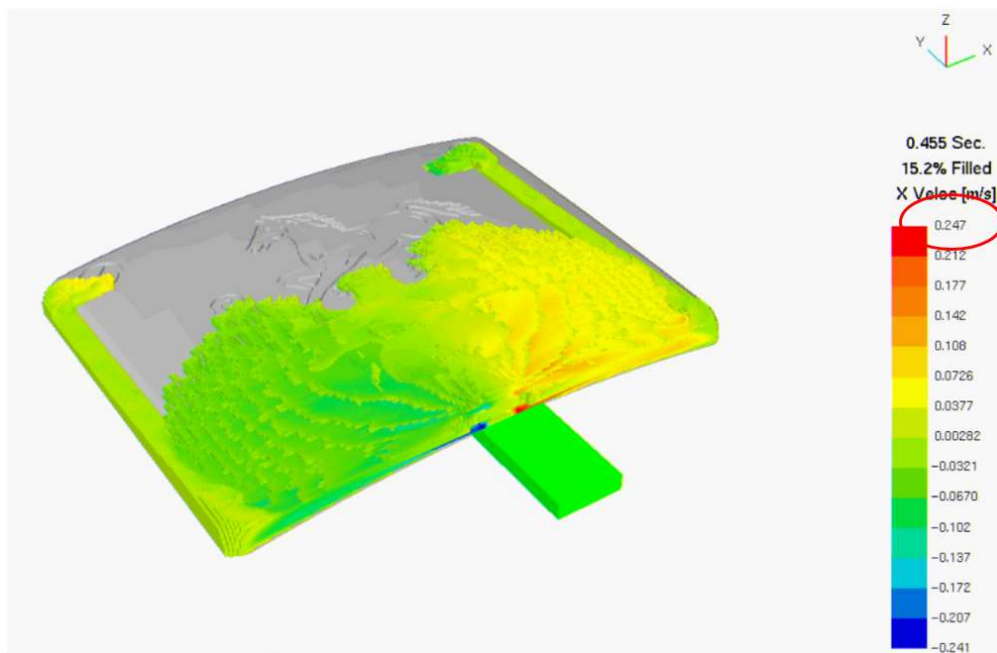


Figura 103 - Hipótese atual com velocidade de injeção de 0,247 m/s aos 15,2% de enchimento

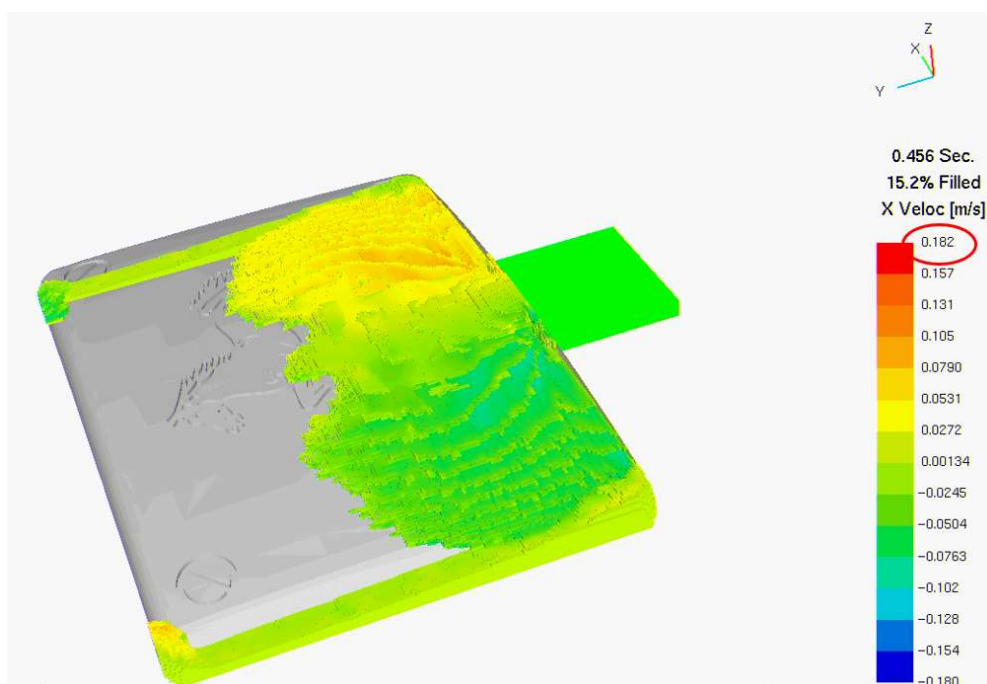


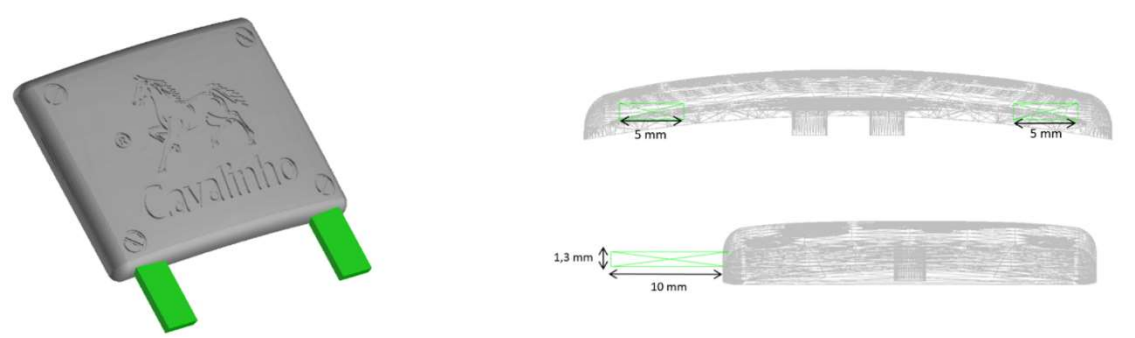
Figura 104 - Primeira hipótese com velocidade de injeção de 0,182 m/s aos 15,2% de enchimento

A simulação apresentada na Tabela 43 traz uma nova abordagem no enchimento da peça, utilizando dois canais de alimentação.

Tabela 43 - Simulação em FlowCast - Hipótese 4

Hipótese 4 – Cavalinho 10

Peça e dimensões utilizadas

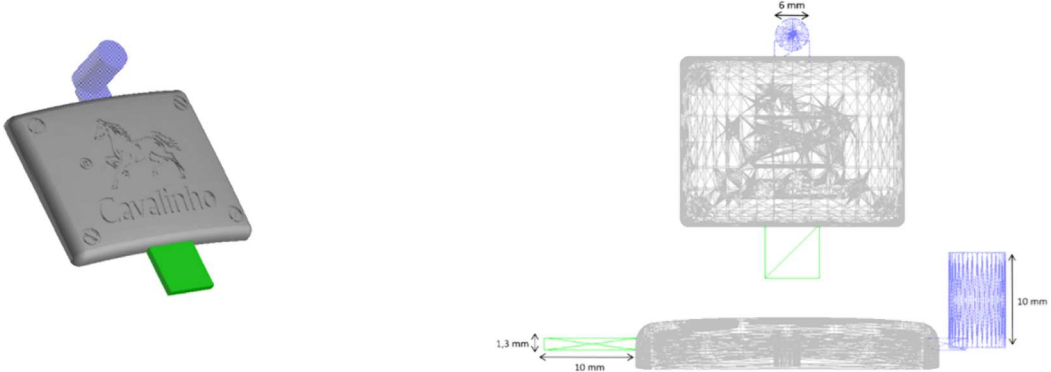
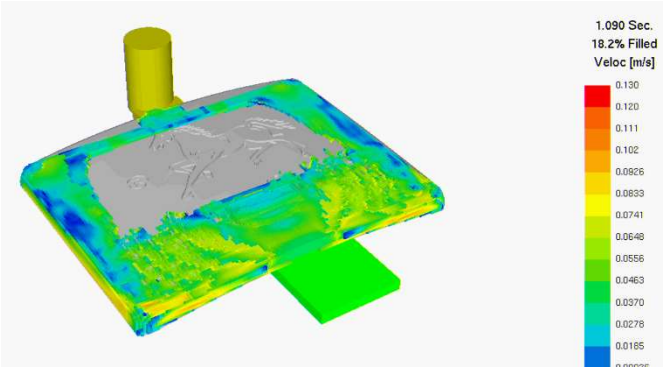


Parâmetros	Resultados
Material do molde -----	Aço
Material -----	Zamak 3
Coeficiente externo de transferência de calor-----	1,50 %
Material de fundição/ Material do alimentador-----	100 %
Ambiente/Material de fundição -----	10 %
Aço/Material de fundição -----	50 %
Grafite/Material de fundição –	0 %
Material do alimentador/Ambiente -----	10%
Material do alimentador/Aço -	50 %
Material do alimentador/Grafite -----	0 %
Ambiente/Aço -----	10 %
Ambiente/Grafite -----	0 %
Aço/Grafite -----	0 %
Temperatura Ambiente -----	25 °C
Tempo de vazamento -----	6 s

Aqui, os resultados poderiam ser ainda mais gravosos do que na hipótese 2, já que a zona central da peça é “obrigada” a ser a última a receber o material. Por consequência, isso trará todos os problemas já mencionados, com a agravante de não ter como expulsar o ar, pelo que ocorrerá a formação de bolhas/poros.

Na simulação seguinte, mostrada na Tabela 44, optou-se por regressar à atual forma de enchimento no molde, com a criação de um alimentador no lado oposto da injeção, para verificar o seu efeito no enchimento da peça.

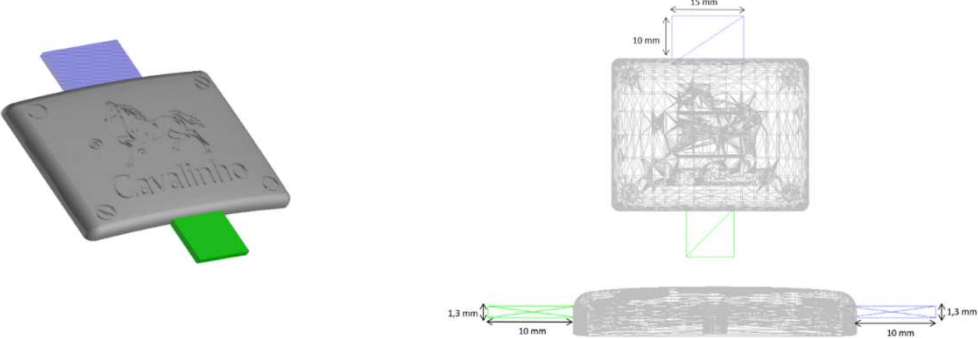
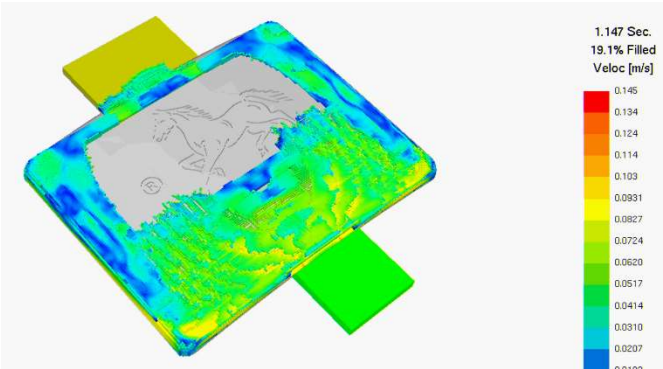
Tabela 44 - Simulação em FlowCast – Hipótese 5

Hipótese 5 – Cavalinho 11	
Peça e dimensões utilizadas	
	
Parâmetros	Resultados
Material do molde -----	Aço
Material -----	Zamak 3
Coeficiente externo de transferência de calor-----	1,50 %
Material de fundição/ Material do alimentador-----	100 %
Ambiente/Material de fundição -----	10 %
Aço/Material de fundição -----	50 %
Grafite/Material de fundição –	0 %
Material do alimentador/Ambiente -----	10%
Material do alimentador/Aço -	50 %
Material do alimentador/Grafite -----	0 %
Ambiente/Aço -----	10 %
Ambiente/Grafite -----	0 %
Aço/Grafite -----	0 %
Temperatura Ambiente -----	25 °C
Tempo de vazamento -----	6 s
	

Tendo em conta o problema referido na hipótese anterior, na presente iteração criou-se um “depósito” de material de forma a contornar o problema, com o objetivo de promover o fluxo (para onde este pudesse fluir) de forma a melhorar a injeção do metal para a cavidade. No entanto, esta hipótese não será solução, uma vez que não existe pressão suficiente para fazer subir o metal pelo “depósito”, ficando apenas a servir como um pequeno escape, que não deve ser suficiente.

Uma vez que este “depósito” de material não se mostrou suficiente para o resultado pretendido, na simulação mostrada na Tabela 45 foi substituído por um escape de material diferente.

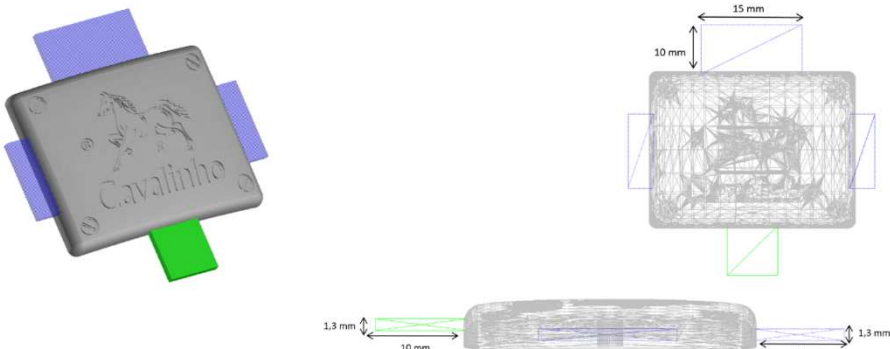
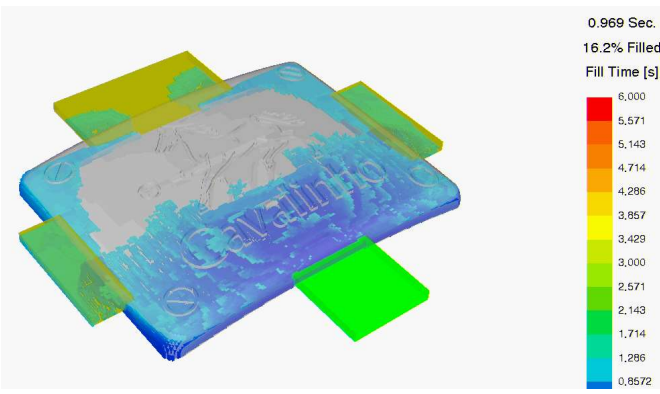
Tabela 45 - Simulação em FlowCast - Hipótese 6

Hipótese 6 – Cavalinho 12	
Peça e dimensões utilizadas	
	
Parâmetros	Resultados
Material do molde -----	Aço
Material -----	Zamak 3
Coefficiente externo de transferência de calor-----	1,50 %
Material de fundição/ Material do alimentador-----	100 %
Ambiente/Material de fundição -----	10 %
Aço/Material de fundição -----	50 %
Grafite/Material de fundição –	0 %
Material do alimentador/Ambiente -----	10%
Material do alimentador/Aço -	50 %
Material do alimentador/Grafite -----	0 %
Ambiente/Aço -----	10 %
Ambiente/Grafite -----	0 %
Aço/Grafite -----	0 %
Temperatura Ambiente -----	25 °C
Tempo de vazamento -----	6 s
	

Neste teste verifica-se que o material flui de uma forma muito mais ágil, diminuindo a turbulência no seu percurso. O “depósito” para o metal também está melhor desenhado, pois permite que o material “escape” durante mais tempo para aquele, deixando espaço para injetar mais material na cavidade. No entanto, observa-se que o material tem tendência a acumular-se nas paredes laterais, portanto uma opção será criar espaços para fuga do material nas laterais da peça.

Essa opção foi simulada, estando apresentada na Tabela 46.

Tabela 46 - Simulação em FlowCast - Hipótese 7

Hipótese 7 – Cavalinho 13	
Peça e dimensões utilizadas	
	
Parâmetros	Resultados
Material do molde -----	Aço
Material -----	Zamak 3
Coeficiente externo de transferência de calor-----	1,50 %
Material de fundição/ Material do alimentador-----	100 %
Ambiente/Material de fundição -----	10 %
Aço/Material de fundição -----	50 %
Grafite/Material de fundição –	0 %
Material do alimentador/Ambiente -----	10%
Material do alimentador/Aço -	50 %
Material do alimentador/Grafite -----	0 %
Ambiente/Aço -----	10 %
Ambiente/Grafite -----	0 %
Aço/Grafite -----	0 %
Temperatura Ambiente -----	25 °C
Tempo de vazamento -----	6 s
	

Nesta iteração desenvolveram-se os escapes laterais para fuga do metal, no entanto, as mesmas não se mostraram muito solucionadoras do problema, uma vez que a meio da injeção já se encontram totalmente preenchidas, não deixando espaço para a libertação de ar que possa existir no centro da peça (como se pode observar na Figura 105).

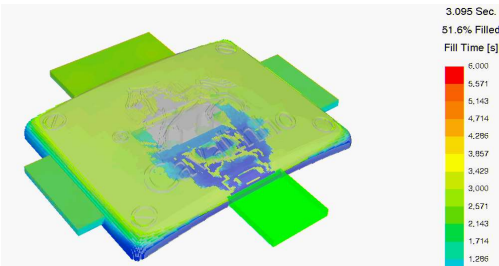


Figura 105 - Preenchimento total dos escapes de gases dando lugar a gases de injeção que poderão ficar retidos no centro da peça



Após análise dos resultados obtidos até ao momento, verificam-se alguns pontos críticos comuns:

- Turbulência na entrada do material;
- Formação de bolhas/poros na peça por acumulação de ar no interior da cavidade;
- Última área a encher na cavidade é a parte central da peça (zona mais crítica do Cavalinho).

Por essa razão, efetuou-se uma análise SWOT aos resultados obtidos, por forma a escolher o caminho a seguir na resolução deste problema.

### 3.4. Análise SWOT dos resultados obtidos

A Figura 108 mostra a análise SWOT realizada no seguimento do estudo do fluxo de material, durante a injeção do Zamak.



Figura 106 - Análise SWOT dos resultados obtidos

Após avaliar os resultados obtidos e se realizar a análise SWOT aos mesmos, percebe-se que, de todas as formas de injetar testadas até ao momento, nenhuma delas traz garantia de que não irão ocorrer os mesmos problemas durante a injeção real na máquina. Assim, foi necessário pensar noutra solução.

Tendo em conta as ameaças ao processo, que não são passíveis de controlar, é preciso focar nas forças e oportunidades e tentar eliminar as fraquezas analisadas até ao momento. Foi com base em todos estes fatores que surgiu a ideia de virar a peça “ao contrário” no molde e utilizar o efeito da gravidade no enchimento da mesma.

Ao inverter a peça, muitos dos problemas (fraquezas) iriam ficar resolvidos pelo simples facto da zona mais crítica da peça ser a primeira a encher/solidificar. A parte traseira da peça não possui critérios de qualidade restritos a nível estético, uma vez que não irá ficar visível depois de aplicada. A zona do Cavalinho, ao ser a primeira zona a encher, irá receber o material muito mais fluido, ao contrário do que acontecia anteriormente, já que parte do material se encontrava mais solidificada no final da injeção.

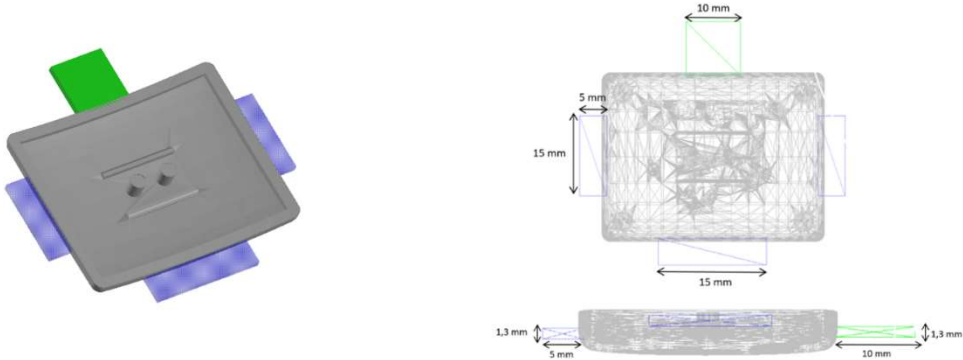
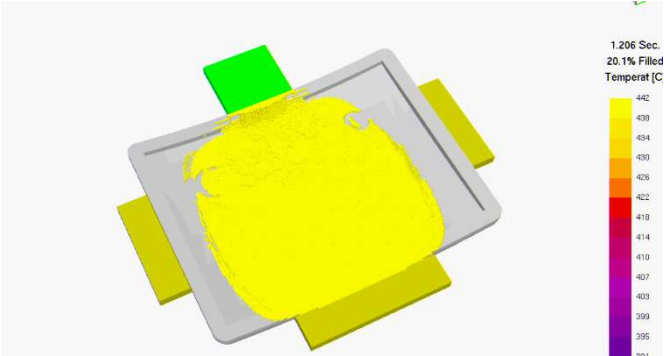
Outro aspeto a ter em conta é a existência de uma zona para “fuga” do material que torne a injeção mais fluida, atenuando os fluxos cruzados de material e o aprisionamento do ar. Assim, antes de efetuar qualquer alteração ao molde, foram realizadas simulações, à semelhança das anteriores, para que se pudesse fundamentar as alterações a realizar, já que este é um dos pontos fortes na análise SWOT.

O *software* tem em conta a posição da peça face ao seu referencial, dessa forma foi possível transpor o efeito da gravidade para a simulação.

Na Tabela 47 está registada a posição da peça na simulação, com os mesmos escapes de material da Hipótese 7, podendo desta forma comparar os resultados de ambas as simulações.



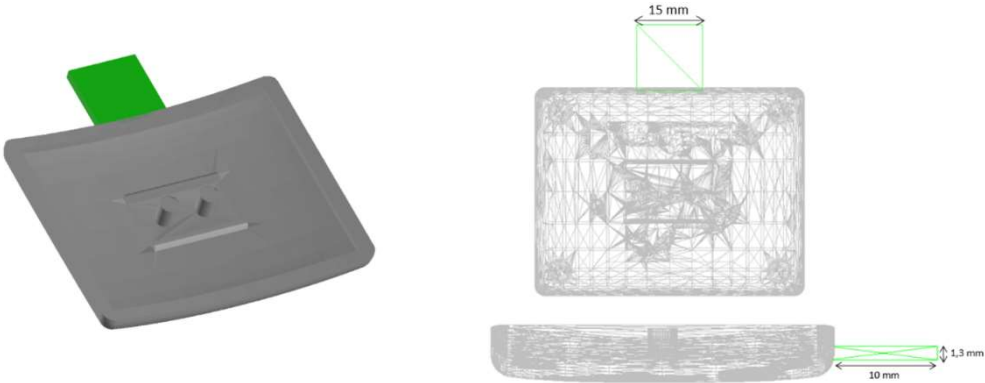
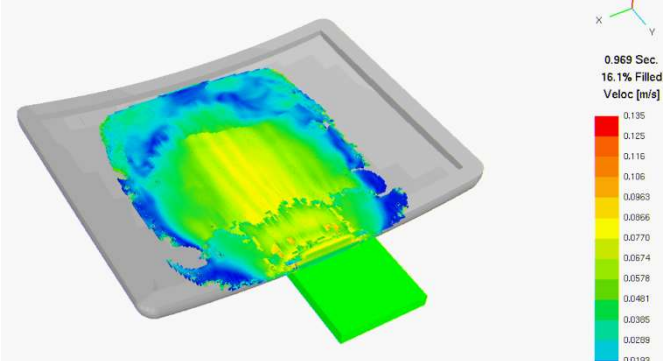
Tabela 47 - Simulação em FlowCast - Hipótese 8

Hipótese 8 – Cavalinho 15	
Peça e dimensões utilizadas	
	
Parâmetros	Resultados
Material do molde -----	Aço
Material -----	Zamak 3
Coeficiente externo de transferência de calor-----	1,50 %
Material de fundição/ Material do alimentador-----	100 %
Ambiente/Material de fundição -----	10 %
Aço/Material de fundição -----	50 %
Grafite/Material de fundição –	0 %
Material do alimentador/Ambiente -----	10%
Material do alimentador/Aço -	50 %
Material do alimentador/Grafite -----	0 %
Ambiente/Aço -----	10 %
Ambiente/Grafite -----	0 %
Aço/Grafite -----	0 %
Temperatura Ambiente -----	25 °C
Tempo de vazamento -----	6 s
	

Comparando os resultados obtidos nesta simulação com a Hipótese 7, o percurso do material está muito mais fluido pelo centro da peça, não causando turbulência nem marcas de fluxo. O escape no lado oposto ao da injeção é bem utilizado como tal, ao contrário dos “escapes” nas laterais da peça, uma vez que, nesta situação, o material não se irá espalhar primeiro pelas laterais.

É interessante simular os efeitos do molde invertido com as atuais condições de injeção da peça. Essa Hipótese está retratada na Tabela 48, Hipótese 9.

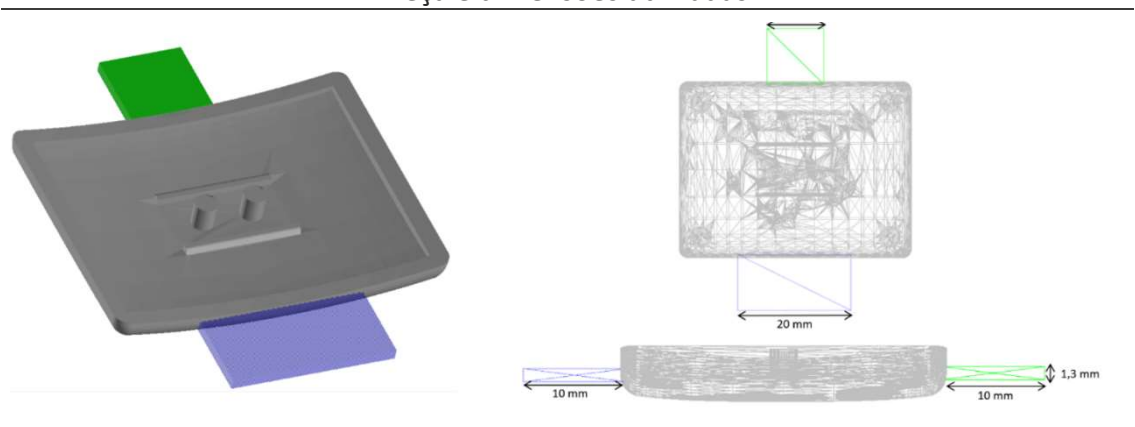
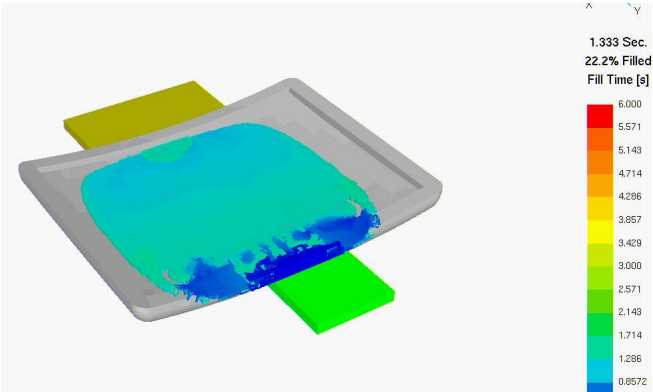
Tabela 48 - Simulação em FlowCast - Hipótese 9

Hipótese 9 – Cavalinho 17	
Peça e dimensões utilizadas	
	
Parâmetros	Resultados
Material do molde -----	Aço
Material -----	Zamak 3
Coeficiente externo de transferência de calor-----	1,50 %
Material de fundição/ Material do alimentador-----	100 %
Ambiente/Material de fundição -----	10 %
Aço/Material de fundição -----	50 %
Grafite/Material de fundição –	0 %
Material do alimentador/Ambiente -----	10%
Material do alimentador/Aço -	50 %
Material do alimentador/Grafite -----	0 %
Ambiente/Aço -----	10 %
Ambiente/Grafite -----	0 %
Aço/Grafite -----	0 %
Temperatura Ambiente -----	25 °C
Tempo de vazamento -----	6 s
	

Esta hipótese retrata a situação atual de injeção, com a diferença da peça estar invertida. A diferença comparativamente com a hipótese anterior é que, nesta, o material não tem por onde fluir de forma a libertar o ar que possa encontrar-se aprisionado no molde. Isto pode fazer com que seja necessário aumentar a pressão para se conseguir fazer chegar o metal a toda a cavidade.

A Tabela 49 apresenta a comparação com os resultados obtidos anteriormente na simulação com a Hipótese 6.

Tabela 49 - Simulação em FlowCast - Hipótese 10

Hipótese 10 – Cavalinho 20	
Peça e dimensões utilizadas	
	
Parâmetros	Resultados
Material do molde -----	Aço
Material -----	Zamak 3
Coeficiente externo de transferência de calor-----	1,50 %
Material de fundição/ Material do alimentador-----	100 %
Ambiente/Material de fundição -----	10 %
Aço/Material de fundição -----	50 %
Grafite/Material de fundição –	0 %
Material do alimentador/Ambiente -----	10%
Material do alimentador/Aço -	50 %
Material do alimentador/Grafite -----	0 %
Ambiente/Aço -----	10 %
Ambiente/Grafite -----	0 %
Aço/Grafite -----	0 %
Temperatura Ambiente -----	25 °C
Tempo de vazamento -----	6 s
	

Aqui, tudo ocorre à semelhança com a hipótese 9, com a diferença de que não existem as fugas nas laterais, e a que existe no lado oposto à injeção é maior permitindo, durante mais tempo, maior fluidez do material.

A hipótese 8 retrata todas as alterações que foram referidas após a análise SWOT e ambas as hipóteses 9 e 10 retratam parte dessas alterações. A hipótese 9 retrata talvez um primeiro passo na alteração do molde (inversão do molde) até chegar à hipótese 8, passando primeiro pela 10 (escape frontal) e também pela criação de escapes laterais de material. Pelos resultados obtidos através do *SolidCast*<sup>™</sup>, observa-se que o fluxo de

material foi o esperado, enchendo inicialmente a parte crítica da peça, permitindo um fluxo de material mais fluido e com menos problemas nas reentrâncias da peça.

Posto isto e, com fundamento nas simulações em *SolidCast™*, efetuaram-se alterações ao molde com vista a melhorar o processo de injeção destas peças.

### 3.5. Implementação de melhorias

#### 3.5.1. Inversão do molde

Inicialmente, apenas se alterou o molde para inverter a peça, de modo a testar apenas um efeito: o da gravidade. Para isso, a PR-Metal fez as alterações ao mesmo, e posteriormente, foi realizado um novo ensaio, com Zamak 3, de forma a analisar o resultado desta alteração.

O sentido da injeção na máquina continua a ser igual ao inicial, no entanto, o molde foi invertido (ver Figura 107).

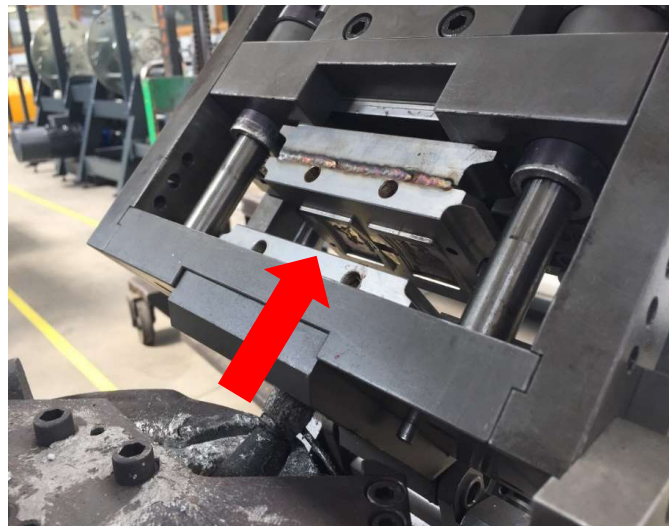


Figura 107 - Sentido da injeção

A nomenclatura na legenda de cada tabela passa a ter o seguinte significado:

MZ3P05TE6TA005TS05MI – MZ3: Material Zamak 3; P05: Pressão de injeção 0,5 bar; TE6: Tempo de enchimento 6 s; TA005: Tempo de arrefecimento 0,05 s; TS05 – Tempo de sopro 0,5 s; MI – Molde invertido.

Tabela 50 - Ensaio D1 - MZ3P05TE6TA005TS05MI

<b>D1</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Pressão de injeção</b>	0,5	bar
	<b>Tempo de enchimento</b>	6	seg
	<b>Tempo de arrefecimento</b>	0,05	seg
	<b>Tempo de sopro</b>	0,5	seg

Denota-se um aspeto “mais fluido” no material, comparativamente com o ensaio anterior com Zamak 3. No entanto, continua a verificar-se alguma turbulência na zona do enchimento e preenchimento deficiente. Verifica-se também que o fluxo de material mudou, nomeadamente na zona da injeção, na parte traseira da peça. Percebe-se pela Figura 108, que no ensaio anterior o material oferecia maior resistência do que no ensaio em questão.



Figura 108 - Ensaio D1 - MZ3P05TE6TA005TS05MI – Peça com turbulência e respetiva comparação com a peça obtida no primeiro ensaio com Zamak 3

Tabela 51 - Ensaio D2 - MZ3P1TE6TA005TS05MI

<b>D2</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	1	bar
	Tempo de enchimento	6	seg
	Tempo de arrefecimento	0,05	seg
	Tempo de sopro	0,5	seg

Comparando com a peça obtida na iteração C3, esta apresenta menos marcas de fluxo e turbulência no centro da peça (na parte frontal da mesma). Nota-se apenas uma fissura que se encontra assinalada na Figura 109. Na parte traseira, o aspeto da peça é pior, mas os pinos encheram quase na sua totalidade, ao contrário do que acontece com a peça do ensaio anterior. As marcas que são visíveis na peça, muito provavelmente desapareceriam ao passar posteriormente por um processo de granalhagem.



Figura 109 - Ensaio D2 - MZ3P1TE6TA005TS05MI – Peça com marcas de fluxo, turbulência e uma fissura assinalada

Tabela 52 - Ensaio D3 - MZ3P25TE6TA005TS05MI

<b>D3</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	2,5	bar
	Tempo de enchimento	6	seg
	Tempo de arrefecimento	0,05	seg
	Tempo de sopro	0,5	seg

Tal como no ensaio anterior, o aumento de pressão diminui drasticamente a qualidade do aspeto visual da peça. Ao contrário da peça nº 4 do ensaio anterior (C4), a parte de trás da peça apresenta várias porosidades, salientadas na Figura 110. Outro facto é que em ambos os ensaios, as peças injetadas com estes parâmetros encheram os pinos traseiros. Apesar do seu mau aspeto visual, a peça encontra-se bem moldada e sem



fissuras, pelo que, ao passar pelo processo de granalhagem, provavelmente atingiria o aspeto visual desejado.



Figura 110 - Ensaio D3 - MZ3P25TE6TA005TS05MI – Peça cheia, mas com porosidades

Tabela 53 - Ensaio D4 - MZ3P05TE3TA005TS05MI

D4	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	0,5	bar
	Tempo de enchimento	3	seg
	Tempo de arrefecimento	0,05	seg
	Tempo de sopro	0,5	seg

Comparativamente à peça C5 do ensaio anterior, nesta o cavalo surge com maior definição (no primeiro ensaio com Zamak 3 o cavalo não está totalmente cheio), a fissura central que surge é maior, o preenchimento deficiente nos pinos traseiros é menor, mas observa-se também preenchimento deficiente na parte traseira da peça, na zona de entrada do material. Verifica-se ainda que as zonas de união de material à entrada se distribuem de forma diferente, sendo que neste ensaio o ângulo por onde o material se distribui é maior. Ver Figura 111.

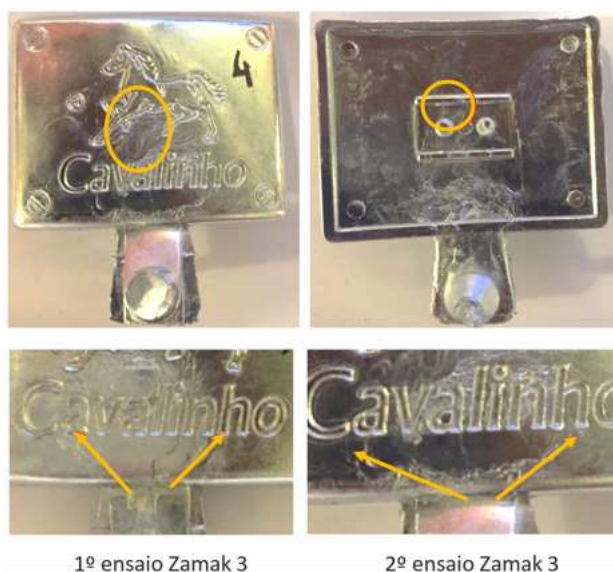


Figura 111 - Ensaio D4 - MZ3P05TE3TA005TS05MI – Peça com preenchimento deficiente e fissura central. Em baixo, comparação entre o ângulo à entrada do material na peça obtida no primeiro ensaio realizado com Zamak 3

Tabela 54 - Ensaio D5 - MZ3P02TE6TA005TS05MI

<b>D5</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Pressão de injeção</b>	0,2	bar
	<b>Tempo de enchimento</b>	6	seg
	<b>Tempo de arrefecimento</b>	0,05	seg
	<b>Tempo de sopro</b>	0,5	seg

Ao comparar esta peça com a peça realizada com os mesmos parâmetros no ensaio anterior (C6), percebe-se que esta apresenta muito melhor aspeto face à anterior. No entanto, o cavalo não se apresenta tão definido como na outra peça e surge maior turbulência no material na zona central da peça, que se pode observar na Figura 112. Aparecem ainda fissuras, mais preenchimento deficiente nos pinos traseiros e ainda outras zonas (de união de material), assinaladas nas imagens.



Figura 112 - Ensaio D5 - MZ3P02TE6TA005TS05MI – Peça com marcas de união de material e turbulência na zona de injeção do material

Tabela 55 - Ensaio D6 - MZ3P01TE6TA005TS05MI

<b>D6</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Pressão de injeção</b>	0,1	bar
	<b>Tempo de enchimento</b>	6	seg
	<b>Tempo de arrefecimento</b>	0,05	seg
	<b>Tempo de sopro</b>	0,5	seg

O resultado desta parametrização neste segundo ensaio é bastante diferente ao que ocorre no ensaio anterior, sendo que nesta iteração é perceptível o “efeito da gravidade” que se esperava obter ao inverter o molde, uma vez que, apesar do enchimento deficiente, a zona central da peça, nomeadamente o cavalo, encontra-se bem melhor definida do que na peça obtida na iteração C7. Não fosse o enchimento deficiente, a



peça apresentaria um aspeto perfeitamente aceitável para posterior tratamento e obtenção do aspeto desejado. As zonas de preenchimento deficiente assinaladas na Figura 113 vêm confirmar que as zonas de enchimento deficientes obtidas na iteração anterior se devem à união do material pelo fluxo que apresenta.



Figura 113 - Ensaio D6 - MZ3P01TE6TA005TS05MI – Peça incompleta onde é possível observar as zonas de união do material

Nota: O fluxo de material nestas condições varia novamente, apresentando uma configuração diferente da do ensaio realizado a 15-02-2016, quando o material foi alterado para Zamak 3 pela primeira vez (ver Figura 114).

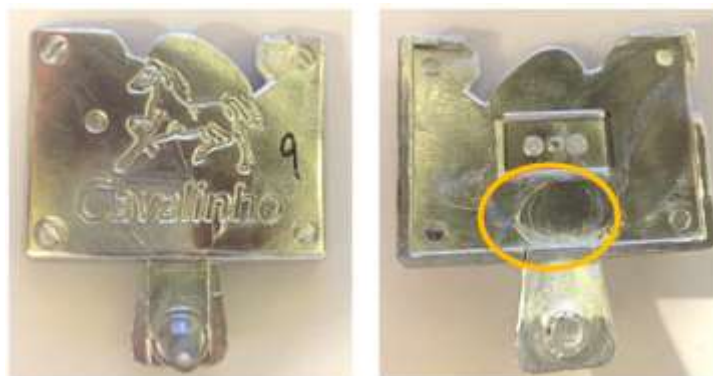


Figura 114 - Configuração do fluxo do material no ensaio de 15-02-2016, com Zamak 3 e molde simples (não invertido)

Tabela 56 - Ensaio D7 - MZ3P01TE4TA005TS05MI

<b>D7</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Pressão de injeção</b>	0,1	bar
	<b>Tempo de enchimento</b>	4	seg
	<b>Tempo de arrefecimento</b>	0,05	seg
	<b>Tempo de sopro</b>	0,5	seg

Esta iteração, quando comparada com a iteração 7 do ensaio anterior (C7), permite identificar um fluxo de material bem diferente do anterior. Observa-se novamente maior definição neste ensaio com o molde invertido e ainda maior enchimento na parte traseira da peça comparado com o ensaio anterior (ver Figura 115). Não se observam fissuras.



Figura 115 - Ensaio D7 - MZ3P01TE4TA005TS05MI – Peça incompleta, mas com maior fluidez

Tabela 57 - Ensaio D8 - MZ3P02TE8TA005TS05MI

<b>D8</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Pressão de injeção</b>	0,2	bar
	<b>Tempo de enchimento</b>	8	seg
	<b>Tempo de arrefecimento</b>	0,05	seg
	<b>Tempo de sopro</b>	0,5	seg

Ao contrário do que aconteceu com a peça da iteração C9, o enchimento deficiente que aqui se verifica não é tão grave. Os pinos traseiros estão mais completos, mas verificam-se alguns pontos de preenchimento deficiente (nomeadamente nas zonas de união do material). Observa-se ainda o aparecimento de uma gota fria na zona assinalada na Figura 116.



Figura 116 - Ensaio D8 - MZ3P02TE8TA005TS05MI – Peça com gota fria na zona assinalada

Tabela 58 - Ensaio D9 - MZ3P02TE4TA005TS05MI

<b>D9</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Pressão de injeção</b>	0,2	bar
	<b>Tempo de enchimento</b>	4	seg
	<b>Tempo de arrefecimento</b>	0,05	seg
	<b>Tempo de sopro</b>	0,5	seg

Esta peça apresenta melhor definição e defeitos menos graves de enchimento, em contraste com a peça obtida na iteração C10 (anterior à inversão do molde). É possível observar na Figura 117 marcas de fluxo na peça.



Figura 117 - Ensaio D9 - MZ3P02TE4TA005TS05MI – Peça com marcas de fluxo

Tabela 59 - Ensaio D10 - MZ3P03TE8TA005TS05MI

<b>D10</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Pressão de injeção</b>	0,3	bar
	<b>Tempo de enchimento</b>	8	seg
	<b>Tempo de arrefecimento</b>	0,05	seg
	<b>Tempo de sopro</b>	0,5	seg

Nesta iteração, o aspeto visual da peça é pior e, ao contrário do que acontece com a peça da iteração C11 (com os mesmos parâmetros), verifica-se uma zona de preenchimento deficiente na junção do material.



Figura 118 - Ensaio D10 - MZ3P03TE8TA005TS05MI – Peça com preenchimento deficiente na linha de junção do material

Em suma, denota-se uma ligeira melhoria, mas a alteração não resolveu os problemas já existentes. A turbulência do material ainda é bastante notável, a qual é responsável por causar marcas de fluxo na zona de injeção e falhas de material.

### 3.6. Análise dos resultados obtidos e considerações a tomar para futuros ensaios

Até ao momento, foram realizados ensaios com Zamak 5 e com Zamak 3, com o molde na posição inicial e invertido, para utilização do efeito da gravidade. Com a alteração destes fatores, os resultados comuns passíveis de obter são:

Tabela 60 - Matriz de resultados comuns entre ensaios com Zamak 5 e Zamak 3

Zamak	Resultado com aumento	Resultado com diminuição	Principal defeito verificado	Valores máximos aceitáveis	Valores mínimos aceitáveis
da Pressão de Injeção	Melhora o enchimento da peça, mas piora o aspeto visual, criando turbulência.	Dificulta o enchimento da peça, melhora o aspeto visual da peça.	Falta de preenchimento, fissuras.	0,2	0,4
do Tempo de Enchimento	Melhora enchimento, mas introduz marcas de fluxo. Se este for elevado e a pressão for baixa, causa maioritariamente preenchimento deficiente à entrada do material.	Quanto mais rápida for a injeção, menos as marcas de fluxo surgem devido ao arrefecimento do material.	Preenchimento deficiente, poros, fissuras, rebarbas.	1	0,3
do Tempo de Arrefecimento	Não existem grandes diferenças nos resultados. Um maior tempo de arrefecimento apenas permite que a peça esteja mais “solidificada” e corra menos riscos de se amolgar. No entanto, o tempo de solidificação do material é tão curto que não permite analisar os resultados com variações no tempo de arrefecimento.				
do Tempo de Sopro	Tal como o tempo de arrefecimento, não se mostrou importante nos ensaios realizados.				

Uma vez que o **Tempo de Arrefecimento** e o **Tempo de Sopro** não mostram influência nos resultados, estes serão desconsiderados para efeitos de parametrização dos ensaios futuros. Isto ocorre porque a injeção é tão rápida e as peças tão pequenas, que com a variação destes parâmetros acaba por não surtir qualquer efeito vantajoso.

De notar que, pelo facto da extração das peças do molde ser feita utilizando uma chave de fendas e um alicate, existe um defeito generalizado nas peças que é causado devido ao método de extração. Em produção corrente, este processo de ejeção seria devidamente corrigido por um processo automático e que não causasse danos à peça injetada.

Este defeito deve ser ignorado relativamente ao estado geral das peças pois, obtendo o resultado pretendido, seria possível, futuramente, investir num novo molde com um sistema de extração das peças.

Esse defeito pode ser visto na Figura 119.



Figura 119 - Defeito comum nas peças, causado pelo método de extração das mesmas

Este defeito é mais notório nas peças que se encontram mais compactas, mais acomodadas na cavidade, já que estas foram mais difíceis de retirar do molde.

### 3.6.1. Escape de material frontal

Face ao fluxo de material atual, entende-se que o material poderá necessitar de mais espaço para poder fluir melhor para as cavidades do molde, minimizando as juntas de material ao longo do enchimento da peça.

Posto isto, optou-se por efetuar inicialmente um escape de material frontal, de modo a que este se pudesse libertar melhor na frente do molde, tal como mostram a Figura 120 - Cavidade 52,5% cheia, com escape frontal de material e a Figura 123, retiradas da simulação realizada com a hipótese 10.

Desta forma, permite-se que o material flua para as laterais, evitando ou reduzindo o risco de criação de linhas de junta na peça injetada.

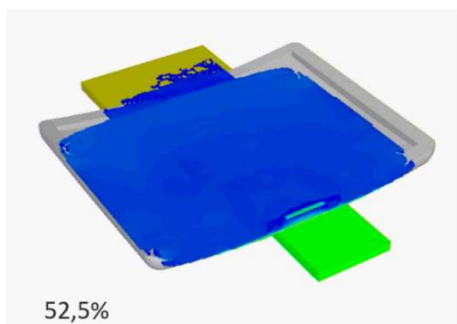


Figura 120 - Cavidade 52,5% cheia, com escape frontal de material

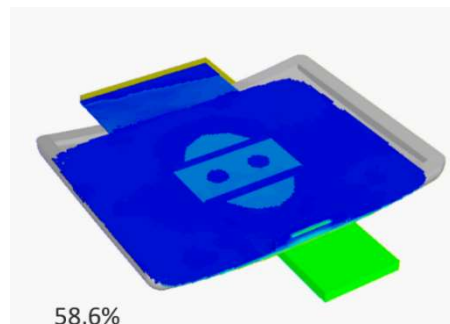


Figura 121 - Cavidade 58,6% cheia, com escape frontal de material

Esta alteração foi efetuada apenas na parte de cima da peça (realçada na Figura 122 abaixo), com as dimensões indicadas, de modo a evitar alterações desnecessárias, promovendo uma melhor comparação/análise de resultados. Assim, é possível perceber, passo a passo, as consequências de cada alteração realizada.

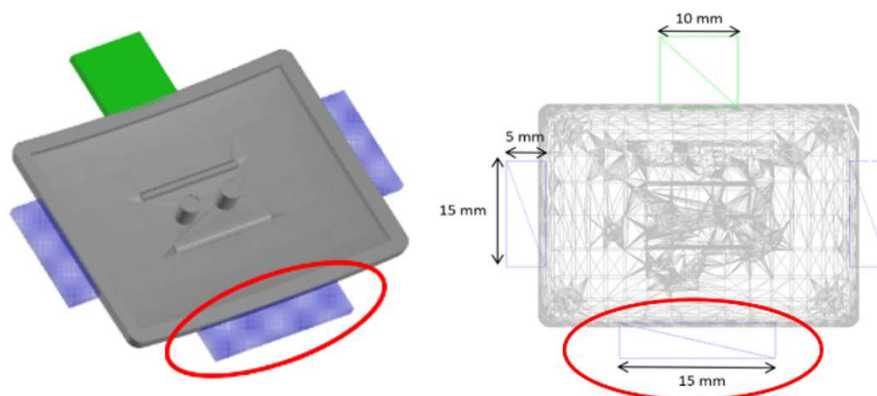


Figura 122 - Esquema do escape frontal criado na peça

Após alteração do molde, foi realizado novo ensaio, tentando sempre que possível replicar os parâmetros utilizados no ensaio anterior.

Neste caso, a nomenclatura na legenda de cada tabela passa a ter o seguinte significado: MZ3P05TE6MIEF – MZ3: Material Zamak 3; P05: Pressão de injeção 0,5 bar; TE6: Tempo de enchimento 6 s; MI – Molde invertido; EF – Escape frontal.



Tabela 61 - Ensaio E1 - MZ3P05TE6MIEF

<b>E1</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Pressão de injeção</b>	0,5	bar
	<b>Tempo de enchimento</b>	6	seg

Nesta primeira iteração verifica-se que o problema da turbulência à entrada da injeção da peça se mantém. Este problema pode ser facilmente visível na Figura 123.



Figura 123 - Ensaio E1 - MZ3P05TE6MIEF – Peça com efeitos de turbulência na zona de injeção

Tabela 62 - Ensaio E5 - MZ3P02TE6MIEF

<b>E5</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Pressão de injeção</b>	0,2	bar
	<b>Tempo de enchimento</b>	6	seg

Diminuindo-se ligeiramente a pressão de injeção, o aspeto exterior da peça é um pouco melhor, mas provoca o aparecimento de uma fissura central e também de bolhas durante o enchimento, as quais irão causar falha de material na zona de injeção. Ver Figura 124.



Figura 124 - Ensaio E5 - MZ3P02TE6MIEF – Peça com fissura central e bolhas

Tabela 63 - Ensaio E7 - MZ3P02TE4MIEF

<b>E7</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Pressão de injeção</b>	0,2	bar
	<b>Tempo de enchimento</b>	4	seg

Mantendo a pressão de injeção como na quinta iteração (E5), e diminuindo o tempo de enchimento, observa-se que a zona de injeção sofreu bastante turbulência no momento da entrada do material na cavidade. Observa-se que a falha de material na zona de injeção se assemelha ao ocorrido no ensaio anterior. Observa-se, na Figura 125, preenchimento deficiente nos pinos traseiros e um aspeto exterior na peça pouco favorável aos resultados pretendidos.



Figura 125 - Ensaio E7 - MZ3P02TE4MIEF – Peça com muita turbulência na injeção, à direita com o pormenor da zona de injeção

Tabela 64 - Ensaio E8 - MZ3P02TE8MIEF

<b>E8</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Pressão de injeção</b>	0,2	bar
	<b>Tempo de enchimento</b>	8	seg

A longa duração do enchimento permitiu que os pinos traseiros não tivessem tanto défice de material, apesar de não estarem totalmente cheios. No entanto, verifica-se na Figura 126 que, pelo tempo que demorou a encher, o material foi solidificando, criando linhas de união do material sem conseguir encher totalmente o escape de material. Também se observa novamente a fissura central na zona de injeção.



Figura 126 - Ensaio E8 - MZ3P02TE8MIEF – Peça com linhas de união do material e fissura central



Tabela 65 - Ensaio E9 - MZ3P02TE4MIEF

<b>E9</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Pressão de injeção</b>	0,2	bar
	<b>Tempo de enchimento</b>	4	seg

Apesar de se ter diminuído o tempo de injeção para metade nesta iteração, a peça apresenta praticamente os mesmos defeitos que a peça obtida na iteração E8. Ver Figura 127.



Figura 127 - Ensaio E9 - MZ3P02TE4MIEF – Peça com fissura central e linhas de união do material

Tabela 66 - Ensaio E10 - MZ3P03TE8MIEF

<b>E10</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Pressão de injeção</b>	0,3	bar
	<b>Tempo de enchimento</b>	8	seg

Ao contrário do que se tem vindo a verificar, o ligeiro aumento de pressão fez com que a peça tivesse menos defeitos superficiais, apresentando melhor aspeto visual. No entanto, continuam a existir os mesmos tipos de defeitos: preenchimento deficiente, falha de material na injeção, fissura central e marcas de fluxo, observáveis na Figura 128.



Figura 128 - Ensaio E10 - MZ3P03TE8MIEF – Peça com preenchimento deficiente, falha de material, fissura central e marcas de fluxo

Tabela 67 - Ensaio E12 - MZ3P05TE8MIEF

E12	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	0,5	bar
	Tempo de enchimento	8	seg

Mantendo o tempo de injeção, verifica-se que, ao aumentar a pressão, a peça fica com defeitos mais vincados, devido ao tempo elevado de enchimento, o que faz com que o material vá solidificando enquanto ainda está a encher a cavidade. Este facto é notório na Figura 131, de onde se observa um local sem material, pois solidificou antes de o material se unir. Caso unisse, poderia causar uma linha de junta de material, a qual também se verifica na Figura 129 abaixo.



Figura 129 - Ensaio E12 - MZ3P03TE8MIEF – Peças com notória formação da linha de junção de material

### 3.6.2. Escapes laterais de material

Dado que os resultados obtidos com abertura frontal para escape de material não foram os mais satisfatórios, decidiu-se avançar com a abertura dos escapes laterais, tal como mostrado na Figura 130.

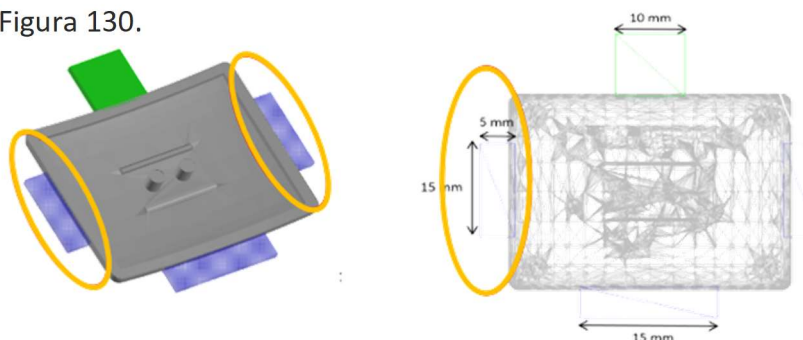


Figura 130 - Esquema de escapes laterais de material a colocar no molde

Como se pode observar pela Figura 131 e pela Figura 132, abaixo mostradas, os escapes laterais permitem que o material flua para lá, antes da peça estar totalmente completa, fazendo deste modo, com que o material possua menos linhas de junta, e flua diretamente para os locais pretendidos.

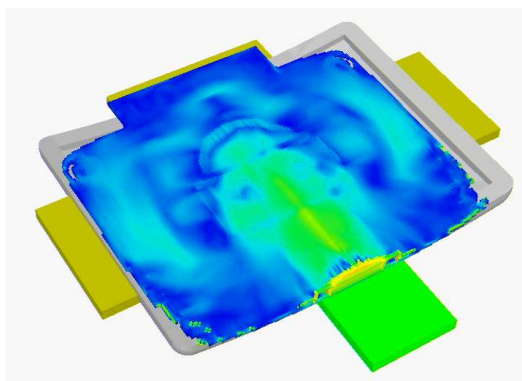


Figura 131 - Cavidade 52,7% cheia, com escapes frontal e laterais de material

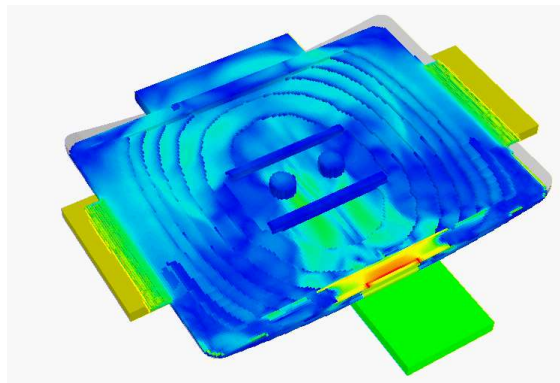


Figura 132 - Cavidade 86,1% cheia, com escapes frontal e laterais de material

A nomenclatura na legenda de cada tabela passa a ter o seguinte significado:

MZ5P15TE4MIEFL – MZ5: Material Zamak 5; P05: Pressão de injeção 1,5 bar; TE6: Tempo de enchimento 4 s; MS – Molde invertido; EFL – Escape frontal e lateral.

Nesta altura, a PR-Metal, Lda. já tinha aceite que, para melhorar em grande parte os resultados, seria necessário alterar a máquina de injeção para que possibilitasse programar uma segunda pressão – a pressão de manutenção. No entanto, devido à impossibilidade de paragem da produção para efetuar as alterações na programação da máquina, ou para trocar o Zamak 5 para o Zamak 3, este ensaio foi realizado com os três escapes de material, com Zamak 5 e sem pressão de manutenção.

Tabela 68 - Ensaio F1 - MZ5P15TE4MIEFL

F1	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	1,5	bar
	Tempo de enchimento	4	seg

Aqui, a pressão utilizada parece ter sido demasiado elevada, já que a peça apresenta muitas marcas de turbulência e rebarbas nos escapes de material. Verifica-se ainda, pela análise da Figura 133, que existem marcas de fluxo por arrefecimento rápido e rechupes.



Figura 133 - Ensaio F1 - MZ5P15TE4MIEFL – Peça com rechupes, marcas de fluxo e rebarbas nos escapes de material

Tabela 69 - Ensaio F2 - MZ5P1TE2MIEFL

F2	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	1	bar
	Tempo de enchimento	2	seg

Os efeitos da utilização de uma pressão mais baixa aqui são notados, já que a turbulência diminui e as rebarbas também, como se pode verificar na Figura 134. No entanto, prevalecem marcas de fluxo e existe também uma depressão no interior do local da injeção do material. Verifica-se também que a cavidade não foi preenchida na totalidade, já que o material não se encontra tão compactado.



Figura 134 - Ensaio F2 - MZ5P1TE2MIEFL – Peça com marcas de fluxo e falha de matéria na zona de injeção

Tabela 70 - Ensaio F3 - MZ5P15TE4MIEFL

F3	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	1,5	bar
	Tempo de enchimento	4	seg

Para tentar que o material ficasse totalmente moldado, voltou-se a elevar a pressão, utilizando então os mesmos parâmetros utilizados em F1, mas o resultado apesar de

favorecer o objetivo, volta a aumentar drasticamente a turbulência do material, ver Figura 135. Este efeito deve-se ao facto de se estar a elevar a temperatura de injeção para moldar o material à cavidade. A pressão de manutenção viria a ajudar neste sentido, não sendo necessário elevar a pressão de injeção, mas sim aproveitando a pressão de manutenção para moldar o material, compensando a contração natural do mesmo na solidificação.



Figura 135 - Ensaio F3 - MZ5P15TE4MIEFL – Peça com muitas marcas de fluxo e fraca qualidade no aspeto visual

Tabela 71 - Ensaio F4 - MZ5P15TE2MIEFL

F4	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	1,5	bar
	Tempo de enchimento	2	seg

Reduzindo o tempo de enchimento, o material flui melhor, não existindo tantas marcas de fluxo. No entanto existe preenchimento deficiente. Neste caso, as rebarbas existentes devem-se à fluidez do material e às folgas no molde, e não à pressão utilizada. Ver Figura 136.



Figura 136 - Ensaio F4 - MZ5P15TE2MIEFL – Peça com marcas de fluxo e preenchimento deficiente nos pinos

Após se verificar que sem uma segunda pressão seria impossível acomodar totalmente o material e, por isso, ficando sempre a peça com preenchimento deficiente ou com



muita turbulência, injetaram-se algumas peças com pressão elevada, apenas para verificar o efeito no metal, visível na Figura 137.



Figura 137 - Peças injetadas com pressão elevada

Pelas peças apresentadas na Figura 139, é possível perceber que os maiores defeitos existentes continuam a ser marcas de fluxo e turbulência, existindo também uma depressão de material na zona de injeção. Em suma, o resultado final não foi o esperado, tanto a nível estético como a nível da qualidade da injeção, diferenciando-se em muito de peças anteriormente injetadas.

Comparativamente com o ensaio anterior, constatou-se que não era possível injetar peças com os parâmetros utilizados, o que obrigou a avaliar o que poderia estar a influenciar os resultados. Assim sendo, optou-se por cortar o bico de injeção a meio (Figura 138), de modo a observar o seu interior, onde se verificou que aquele possuía uma substância que tinha aderido às paredes internas.



Figura 138 - Bico de injeção cortado

Dada a localização do material estranho no bico, acredita-se que esta situação ocorra devido ao uso constante de uma temperatura elevada, o que pode levar a que o bico (nitrurado) se degrade e vá ocorrendo uma obstrução à passagem do material.

Este pode ter sido o fator responsável por não ser possível obter os resultados expectáveis. Assim, apenas utilizando pressões de maior valor é que se conseguia injetar peças. Com a pressão mais elevada, o metal é forçado a injetar. Esta situação também leva a tensões acumuladas no metal, fomentando assim maior turbulência do material na injeção.

As peças obtidas foram enviadas diretamente para granalhagem e polimento. O resultado final encontra-se apresentado na Figura 141.

Nessa figura, verificam-se alguns defeitos na superfície, causados por bolhas de gás e, principalmente, falha de material na zona de injeção (parte traseira da peça). Apesar de, em geral, as peças se encontrarem bem cheias e moldadas, o resultado não é o pretendido. Mas é o expectável tendo em conta o resultado observado antes da granalhagem.

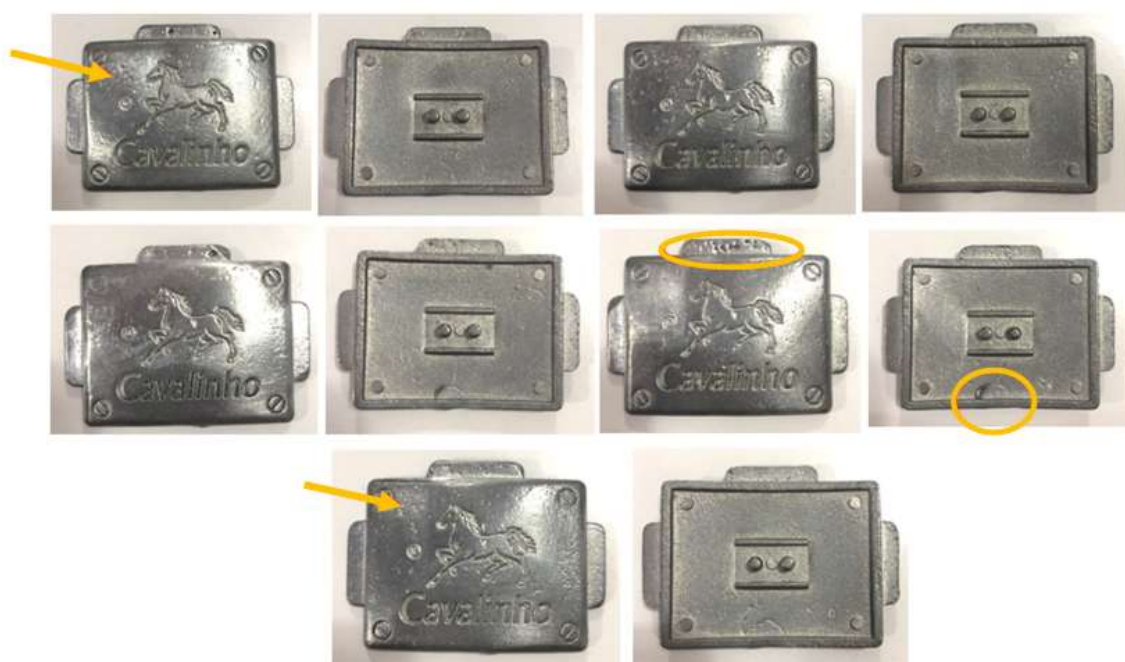


Figura 139 - Peças granalhadas do dia 30-07-2016, com escapes laterais de material



### 3.6.3. Alteração da programação da ZM3 e troca da bomba de injeção

Uma vez comprovado que a fundição injetada desta peça não funcionaria sem uma pressão de manutenção que permitisse uma melhor moldagem e acomodação do material na cavidade, restou aguardar que a alteração à programação da máquina fosse realizada pela PR - Metal, Lda..

Após essa alteração, foram realizados dois novos ensaios, onde foi possível, desde logo, notar melhorias ao nível estético das peças, nomeadamente nas marcas de fluxo. No entanto, após mudança da bomba de injeção, não foi possível injetar peças com valores de pressão tão baixos quanto os que tinham vindo a ser utilizados, já que estes esses valores não permitiam a entrada suficiente de material.

O ensaio de 12-12-2016 foi realizado apenas com o intuito de perceber se funcionaria, naquela máquina, a fundição injetada das peças com recurso a novos parâmetros (Pressão de manutenção e Tempo de manutenção). Uma vez testado o enchimento das peças com a máquina alterada, e comprovada a sua funcionalidade, foi realizado novo ensaio, com o objetivo de estudar o efeito dos parâmetros utilizados em cada injeção.

A nomenclatura na legenda de cada tabela passa a ter o seguinte significado:

MZ3PI1TI07PM6TM001MIEFL – MZ3: Material Zamak 3; PI1: Pressão de injeção 1 bar; TI: Tempo de injeção 0,7 s; PM: Pressão de manutenção 6 bar; TM: Tempo de manutenção 0,01 MS – Molde invertido; EFL – Escape frontal e lateral.

As iterações realizadas encontram-se descritas nos quadros que se apresentam de seguida (Tabela 72 à 89).

Tabela 72 - Ensaio G1 - MZ3PI1TI07PM6TM001MIEFL

<b>G1</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Pressão de injeção</b>	1	bar
	<b>Tempo de injeção</b>	0,7	seg
	<b>Pressão de manutenção</b>	6	seg
	<b>Tempo de manutenção</b>	0,01	seg

Na peça obtida continuam a verificar-se marcas de fluxo (ver Figura 140) e ainda preenchimento deficiente na cavidade. Utilizou-se uma pressão de manutenção elevada de modo a acomodar o material na cavidade. No entanto, esta solução não surtiu os efeitos desejados, provavelmente devido ao tempo demasiado curto para atuação da pressão de manutenção.



Figura 140 - Ensaio G1 - MZ3PI1TI07PM6TM001MIEFL – Peça com marcas de fluxo e boa acomodação do material em alguns pontos

Tabela 73 - Ensaio G2 - MZ3PI1TI1PM4TM3MIEFL

G2	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	1	bar
	Tempo de injeção	1	seg
	Pressão de manutenção	4	seg
	Tempo de manutenção	3	seg

Aumentou-se ligeiramente o tempo de injeção e diminuiu-se um pouco a pressão de manutenção, aumentando significativamente o tempo de manutenção. Estes parâmetros permitiram acomodar melhor o material na cavidade, como se pode verificar na Figura 141, mas pelo tempo elevado da segunda pressão, ocorreram mais defeitos à superfície da peça, gotas frias e marcas de fluxo, bem como a criação de algumas rebarbas, as quais podem ter a sua causa no elevado valor de Pressão de Manutenção.



Figura 141 - Ensaio G2 - MZ3PI1TI1PM4TM3MIEFL – Peça com rebarbas, gotas frias e marcas de fluxo

Tabela 74 - Ensaio G3 - MZ3PI05TI2PM1TM2MIEFL

<b>G3</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Pressão de injeção</b>	0,5	bar
	<b>Tempo de injeção</b>	2	seg
	<b>Pressão de manutenção</b>	1	seg
	<b>Tempo de manutenção</b>	2	seg

Não foi possível injetar a peça da iteração 3 devido aos baixos valores dos parâmetros utilizados.

Tabela 75 - Ensaio G4 - MZ3PI01TI4PM1TM2MIEFL

<b>G4</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Pressão de injeção</b>	0,1	bar
	<b>Tempo de injeção</b>	4	seg
	<b>Pressão de manutenção</b>	1	seg
	<b>Tempo de manutenção</b>	2	seg

Não foi possível injetar a peça da iteração 4 devido aos baixos valores dos parâmetros utilizados.

Tabela 76 - Ensaio G5 - MZ3PI05TI4PM1TM2MIEFL

<b>G5</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Pressão de injeção</b>	0,5	bar
	<b>Tempo de injeção</b>	4	seg
	<b>Pressão de manutenção</b>	1	seg
	<b>Tempo de manutenção</b>	2	seg

Não foi possível injetar a peça da iteração 5 devido aos baixos valores dos parâmetros utilizados.

Tabela 77 - Ensaio G6 - MZ3PI1TI1PM2TM2MIEFL

<b>G6</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Pressão de injeção</b>	1	bar
	<b>Tempo de injeção</b>	1	seg
	<b>Pressão de manutenção</b>	2	seg
	<b>Tempo de manutenção</b>	2	seg

Nesta iteração observa-se que, com uma pressão de manutenção mais baixa, o escape de material frontal já não se encontra totalmente preenchido. Verificam-se, na Figura 142, menos marcas de fluxo, mas preenchimento deficiente num dos pinos traseiros, assim como rechupes.



Figura 142 - Ensaio G6 - MZ3PI1TI1PM2TM2MIEFL – Peça com preenchimento deficiente nos pinos e alguns rechupes

Tabela 78 - Ensaio G7 - MZ3PI1TI1PM15TM2MIEFL

<b>G7</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Pressão de injeção</b>	1	bar
	<b>Tempo de injeção</b>	1	seg
	<b>Pressão de manutenção</b>	1,5	seg
	<b>Tempo de manutenção</b>	2	seg

Neste caso, por se ter diminuído a pressão de manutenção, foi possível encher totalmente o pino traseiro, mas a marca do rechupe permaneceu no mesmo sítio da peça. A zona de injeção também se apresenta bastante defeituosa relativamente à iteração anterior, como se verifica pela Figura 143.



Figura 143 - Ensaio G7 - MZ3PI1TI1PM15TM2MIEFL – Peça com muita turbulência à entrada do material

Tabela 79 - Ensaio G8 - MZ3PI1TI05PM15TM2MIEFL

<b>G8</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Pressão de injeção</b>	1	bar
	<b>Tempo de injeção</b>	0,5	seg
	<b>Pressão de manutenção</b>	1,5	seg
	<b>Tempo de manutenção</b>	2	seg

Com menos tempo de injeção, o material demora menos tempo a chegar a toda a cavidade e, por isso, está menos sujeito a rechupes causados pelas linhas de junção de material. No entanto, o fluxo do material continua claramente notório na Figura 144.



Figura 144 - Ensaio G8 - MZ3PI1TI05PM15TM2MIEFL – Peça com marcas acentuadas de fluxo do material

Tabela 80 - Ensaio G9 - MZ3PI1TI05PM2TM2MIEFL

<b>G9</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	1	bar
	Tempo de injeção	0,5	seg
	Pressão de manutenção	2	seg
	Tempo de manutenção	2	seg

O ligeiro aumento da pressão de manutenção, fez com que o aspeto exterior da peça melhorasse bastante (ver Figura 145). Notam-se apenas algumas marcas de fluxo, principalmente na zona de entrada do material.



Figura 145 - Ensaio G9 - MZ3PI1TI05PM2TM2MIEFL – Peça com marcas de fluxo, mas melhor aspeto visual

Tabela 81 - Ensaio G10 - MZ3PI1TI08PM2TM2MIEFL

<b>G10</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	1	bar
	Tempo de injeção	0,8	seg
	Pressão de manutenção	2	seg
	Tempo de manutenção	2	seg

Aumentando ligeiramente o tempo de injeção do material, é possível verificar, na Figura 146, que o material se molda com maior facilidade, verificando-se que a fluidez do material é mais elevada na parte traseira da peça. No entanto, existe preenchimento deficiente num dos pinos traseiros e é perceptível que existem gases que não são libertados e que se acumulam na cavidade do molde, fazendo-se notar através do aspeto visual da peça.



Figura 146 - Ensaio G10 - MZ3PI1TI08PM2TM2MIEFL – Peça com preenchimento deficiente nos pinos e acumulação de gases no centro da peça

Tabela 82 - Ensaio G11 - MZ3PI15TI08PM2TM2MIEFL

**G11**

Parâmetros	Valor	Unidade
Pressão de injeção	1,5	bar
Tempo de injeção	0,8	seg
Pressão de manutenção	2	seg
Tempo de manutenção	2	seg

Aumentando significativamente a pressão de injeção do material, verifica-se claramente um efeito bastante negativo no aspeto visual da peça injetada. Ver Figura 147.



Figura 147 - Ensaio G11 - MZ3PI15TI08PM2TM2MIEFL – Peça com aspeto visual muito negativo



Tabela 83 - Ensaio G12 - MZ3PI1TI1PM2TM2MIEFL

<b>G12</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	1	bar
	Tempo de injeção	1	seg
	Pressão de manutenção	2	seg
	Tempo de manutenção	2	seg

Retomando o valor de 1 bar como pressão de injeção e aumentando o tempo de injeção, a peça apresenta melhor aspeto visual, mas mais defeitos, incluído preenchimento deficiente nos pinos traseiros. Ver Figura 148.



Figura 148 - Ensaio G12 - MZ3PI1TI1PM2TM2MIEFL – Peça com melhor aspeto visual, mas preenchimento deficiente nos pinos

Tabela 84 - Ensaio G13 - MZ3PI1TI2PM2TM1MIEFL

<b>G13</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	1	bar
	Tempo de injeção	2	seg
	Pressão de manutenção	2	seg
	Tempo de manutenção	1	seg

Ao aumentar o tempo de manutenção, verifica-se que o aspeto exterior da peça é muito mais consolidado, provocando também alguma rebarba. No geral, o aspeto da peça é melhor e não existe preenchimento deficiente, como se pode observar na Figura 149.



Figura 149 - Ensaio G13 - MZ3PI1TI2PM2TM1MIEFL – Peça mais definida, mas com rebarba e preenchimento deficiente nos pinos



Tabela 85 - Ensaio G14 - MZ3PI1TI2PM15TM1MIEFL

**G14**

Parâmetros	Valor	Unidade
Pressão de injeção	1	bar
Tempo de injeção	2	seg
Pressão de manutenção	1,5	seg
Tempo de manutenção	1	seg

Reduzindo a pressão de manutenção, reduz-se a qualidade da peça injetada, sendo que existe preenchimento deficiente nos pinos (visível na Figura 150), apesar de existirem rebarbas devido ao tempo desta segunda pressão.



Figura 150 - Ensaio G14 - MZ3PI1TI2PM15TM1MIEFL – Peça com rebarbas e preenchimento deficiente

Tabela 86 - Ensaio G15 - MZ3PI1TI2PM3TM1MIEFL

**G15**

Parâmetros	Valor	Unidade
Pressão de injeção	1	bar
Tempo de injeção	2	seg
Pressão de manutenção	3	seg
Tempo de manutenção	1	seg

Ao dobrar a pressão de manutenção, não se verifica preenchimento deficiente na peça fundida. Observa-se uma melhor definição da peça (parte frontal). Estranhamente, os escapes de material não ficaram totalmente preenchidos. Verifica-se ainda, na Figura 151, um desnivelamento do molde, através da rebarba criada num dos escapes de material.



Figura 151 - Ensaio G15 - MZ3PI1TI2PM3TM1MIEFL – Peça com preenchimento deficiente e alguma rebarba

Tabela 87 - Ensaio G16 - MZ3PI1TI2PM4TM1MIEFL

**G16**

Parâmetros	Valor	Unidade
Pressão de injeção	1	bar
Tempo de injeção	2	seg
Pressão de manutenção	4	seg
Tempo de manutenção	1	seg

Aumentando ainda mais a pressão de manutenção, verificam-se menos marcas de fluxo na parte frontal da peça. No entanto, observa-se novamente que as cavidades dos escapes de material não foram totalmente preenchidas. Verifica-se também, por observação da Figura 152, preenchimento deficiente nos pinos traseiros e falha de material no local de injeção.



Figura 152 - Ensaio G16 - MZ3PI1TI2PM4TM1MIEFL – Peça com preenchimento deficiente e falha de material no local da injeção de metal

Tabela 88 - Ensaio G17 - MZ3PI1TI2PM3TM2MIEFL

**G17**

Parâmetros	Valor	Unidade
Pressão de injeção	1	bar
Tempo de injeção	2	seg
Pressão de manutenção	3	seg
Tempo de manutenção	2	seg

Através da Figura 155, pode observar-se que com o aumento do tempo da pressão de manutenção de verifica essencialmente moldagem deficiente nos pinos e uma fissura no centro da peça.



Figura 153 - Ensaio G17 - MZ3PI1TI2PM3TM2MIEFL – Peça com preenchimento deficiente nos pinos e fissura central

Tabela 89 - Ensaio G18 - MZ3PI1TI2PM4TM2MIEFL

<b>G18</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Pressão de injeção</b>	1	bar
	<b>Tempo de injeção</b>	2	seg
	<b>Pressão de manutenção</b>	4	seg
	<b>Tempo de manutenção</b>	2	seg

Ao elevar a pressão de manutenção, denotam-se gotas frias, falhas de material na zona de injeção, mau aspeto visual nas peças, rebarbas e preenchimento deficiente nos pinos. Estes defeitos estão assinalados na Figura 154 apresentada de seguida.



Figura 154 - Ensaio G18 - MZ3PI1TI2PM4TM2MIEFL – Peças com rebarbas nos escapes de material, preenchimento deficiente nos pinos traseiros, mau aspeto geral e falhas de material na zona de injeção do metal

Assim, comprova-se que deve existir um equilíbrio no uso da pressão/tempo de manutenção.

Com este ensaio, verifica-se então a incapacidade em injetar peças com pressão de injeção inferior a 1 bar.

Tendo por base os resultados obtidos nos anteriores ensaios realizados, tentou-se realizar a injeção das peças utilizando a menor pressão possível, para tentar que a turbulência à entrada do material fosse também a menor possível. Assim, a menor pressão de injeção possível de utilizar, após alteração da máquina, é de 1 bar. Verifica-se também que, quanto mais moldada/cheia estiver a peça, maior a dificuldade em extraí-la do molde. Tendo em conta os resultados obtidos após alteração na máquina, efetuou-se nova matriz de resultados. A nova matriz é apresentada através da Tabela 90 mostrada de seguida.

Tabela 90 - Matriz de Resultados após alterações de parâmetros na máquina

Zamak 3	Resultado com aumento	Resultado com diminuição	Principal defeito verificado	Valores máximos aceitáveis	Valores mínimos aceitáveis
da Pressão de Injeção	Aspeto visual é pior, mas o material fica visivelmente mais acomodado na cavidade. Rebarbas na peça.	Não injeta.	Aspeto visual medíocre, rebarbas.	1,5	1
do Tempo de Injeção	Mais marcas de fluxo/linhas de união de material.	Abaixo de 1 s, faz com que a velocidade de injeção seja muito elevada, pelo que o material apresente melhor qualidade superficial pelas tensões sofridas.	Marcas de fluxo.	2	1
da Pressão de Manutenção	Peça mais “sólida”, marcas de fluxo ou defeitos superficiais são mais vincados.	Falha de material na zona de injeção.	Preenchimento deficiente.	4	2
do Tempo de Manutenção	Menor qualidade superficial.	Marcas no material menos vincadas.	Fraca qualidade superficial das peças.	2	1

Após análise dos resultados e da nova matriz obtida, verifica-se que existe, no geral, um grave problema ao nível da qualidade exterior das peças. Este facto pode dever-se a gases que são libertados durante a injeção do material e que não têm por onde drenar, acabando por influenciar a forma do material entre a superfície do metal e a cavidade.

#### 3.6.4. Escape de gases

Dado que, apesar de todos os esforços para tentar minimizar a turbulência do material, as peças continuam com muitos defeitos a nível de marcas de fluxo e aspeto visivelmente danificado por gases que não conseguem libertar-se, torna-se então necessário realizar um escape de gases para tentar que os gases não fiquem “presos” entre o material e a cavidade do molde.

Assim, criou-se um escape de gases com a localização indicada na Figura 155 e com 1mm de largura cada um.

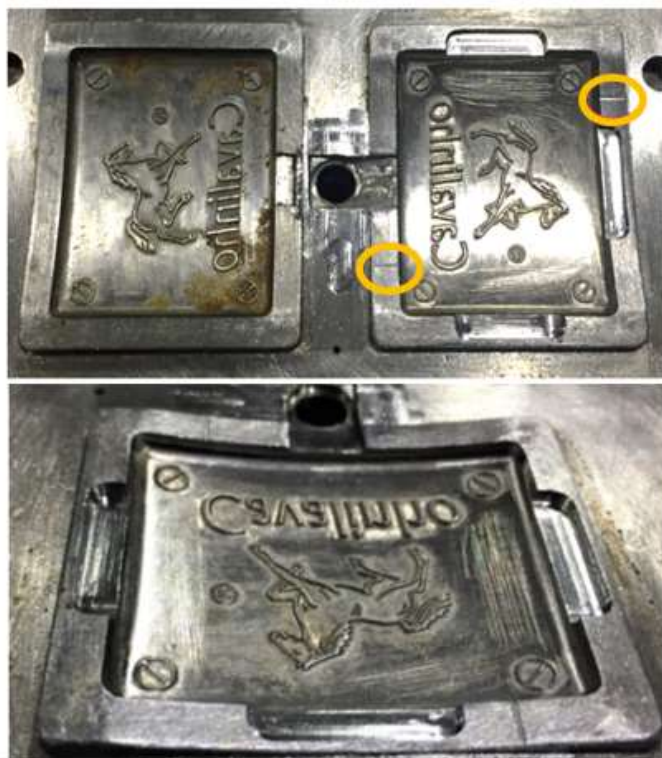


Figura 155 - Molde com escapes de gases assinalados

Após esta alteração, realizou-se um novo lote de ensaios para verificar o seu efeito, e também para avaliar a alteração na fluidez do metal, com aumento da sua temperatura.

A nomenclatura na legenda de cada tabela passa a ter o seguinte significado:

MZ3PI1TI4PM1TM2MIEFLEGT438 – MZ3: Material Zamak 3; P05: Pressão de injeção 1 bar; TI4: Tempo de injeção 4 s; PM1: Pressão de manutenção 1 bar; TM2: Tempo de manutenção 2 s; MI – Molde invertido; EFL – Escape frontal e lateral; EG: Escape de gases; T438: Temperatura 438°C.

Tabela 91 - Ensaio H1 - MZ3PI1TI4PM1TM2MIEFLEGT438

<b>H1</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	1	bar
	Tempo de injeção	4	seg
	Pressão de manutenção	1	seg
	Tempo de manutenção	2	seg

Temperatura do Cadinho:  
438°C

O elevado tempo de enchimento utilizado fez com que a peça ficasse com bastantes marcas de fluxo, causando também rebarbas no cimo da peça. Ver Figura 156.





Figura 156 - Ensaio H1 - MZ3PI1TI4PM1TM2MIEFLEGT438 – Peça com muitas marcas de fluxo e rebarbas no escape de material frontal

Tabela 92 - Ensaio H2 - MZ3PI1TI2PM15TM2MIEFLEGT438

<b>H2</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	1	bar
	Tempo de injeção	2	seg
	Pressão de manutenção	1,5	seg
	Tempo de manutenção	2	seg

Temperatura do Cadinho:  
438°C

Reduzindo para metade o tempo de enchimento 1, apesar de aumentar a pressão 2, verifica-se, na Figura 157, preenchimento deficiente num dos pinos traseiros.



Figura 157 - Ensaio H2 - MZ3PI1TI2PM15TM2MIEFLEGT438 – Peça com preenchimento deficiente num pino traseiro

Tabela 93 - Ensaio H3 - MZ3PI1TI05PM08TM2MIEFLEGT438

<b>H3</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	1	bar
	Tempo de injeção	0,5	seg
	Pressão de manutenção	0,8	seg
	Tempo de manutenção	2	seg

Temperatura do Cadinho:  
438°C

Baixando bastante o tempo de injeção, verifica-se que a peça já não apresenta preenchimento deficiente, mas começa a apresentar indícios de falha de material na zona de injeção (Figura 158).



Figura 158 - Ensaio H3 - MZ3PI1TI05PM08TM2MIEFLEGT438 – Peça com indícios de falha de material na zona de injeção

Tabela 94 - Ensaio H4 - MZ3PI1TI4PM1TM2MIEFLEGT465

<b>H4</b> Temperatura do Cadinho: 465°C	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	0,8	bar
	Tempo de injeção	0,5	seg
	Pressão de manutenção	1	seg
	Tempo de manutenção	0,5	seg

Como expectável, o aumento da temperatura do metal fez com que este tivesse um comportamento mais fluido, tanto que, reduzindo ligeiramente a pressão de injeção, observam-se várias zonas de rebarba. Apesar do aumento da fluidez verifica-se, por observação da Figura 159, um ligeiro preenchimento deficiente num dos pinos traseiros e também uma fissura central na zona de injeção.



Figura 159 - Ensaio H4 - MZ3PI1TI4PM1TM2MIEFLEGT465 – Peça mais fluída devido ao aumento da temperatura mas com fissura central e marcas de fluxo

Tabela 95 - Ensaio H8 - MZ3PI1TI05PM08TM2MIEFLEGT465

<b>H8</b> Temperatura do Cadinho: 465°C	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	1	bar
	Tempo de injeção	0,5	seg
	Pressão de manutenção	0,8	seg
	Tempo de manutenção	2	seg



Nesta iteração, a alteração dos parâmetros permitiu que se eliminassem as rebarbas, notando-se apenas as marcas do fluxo de injeção. No geral, a peça apresenta um aspeto “picado”, talvez pelo facto da injeção ser demasiado rápida e não dar tempo para os gases escaparem. Ver Figura 160.



Figura 160 - Ensaio H8 - MZ3PI1TI05PM08TM2MIEFLEGT465 – Peça com marcas de fluxo e aspeto “picado”

Tabela 96 - Ensaio H9 - MZ3PI05TI05PM08TM05MIEFLEGT465

<b>H9</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	0,5	bar
	Tempo de injeção	0,5	seg
	Pressão de manutenção	0,8	seg
	Tempo de manutenção	0,5	seg

Temperatura do Cadinho:  
465°C

Reduzindo para metade a pressão de injeção, a peça já não fica completa. Verifica-se, na Figura 161, falha de material na zona de injeção e preenchimento deficiente nos pinos traseiros. No entanto, as marcas de fluxo na parte frontal da peça são muito menores.



Figura 161 - Ensaio H9 - MZ3PI05TI05PM08TM05MIEFLEGT465 – Peça com falha de material na zona de injeção

Tabela 97 - Ensaio H10 - MZ3PI03TI05PM08TM03MIEFLEGT465

<b>H10</b> Temperatura do Cadinho: 465°C	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	0,3	bar
	Tempo de injeção	0,5	seg
	Pressão de manutenção	0,8	seg
	Tempo de manutenção	0,3	seg

Continuou-se a diminuir a pressão de injeção, de modo a que fosse possível observar os canais de escape de gases criados. Reduzindo para 0,3 bar ainda não foi possível observar esse efeito, mas verifica-se bastante preenchimento deficiente e gotas frias (Figura 162). Esta peça foi mais fácil de retirar do molde devido ao facto de não estar totalmente acomodada na cavidade.



Figura 162 - Ensaio H10 - MZ3PI03TI05PM08TM03MIEFLEGT465 – Peça com preenchimento deficiente nos pinos e gotas frias

Tabela 98 - Ensaio H11 - MZ3PI02TI05PM08TM05MIEFLEGT465

<b>H11</b> Temperatura do Cadinho: 465°C	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	0,2	bar
	Tempo de injeção	0,5	seg
	Pressão de manutenção	0,8	seg
	Tempo de manutenção	0,5	seg

Reduzindo novamente a pressão de injeção, continua a verificar-se preenchimento deficiente na peça, surgindo agora uma marca de fluxo mais acentuada, apesar do aspeto fluído que apresenta. Aqui, verifica-se também a presença de uma fissura central (Figura 163).



Figura 163 - Ensaio H11 - MZ3PI02TI05PM08TM05MIEFLEGT465 – Peça com marcas de fluxo, preenchimento deficiente e fissura central agravada

Tabela 99 - Ensaio H12 - MZ3PI01TI05PM08TM05MIEFLEGT465

<b>H12</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	0,1	bar
	Tempo de injeção	0,5	seg
	Pressão de manutenção	0,8	seg
	Tempo de manutenção	0,5	seg

Temperatura do Cadinho:  
465°C

A variação dos parâmetros tem levado, até aqui, a uma redução da pressão de injeção, a qual já se encontra reduzida a apenas 0,1 bar, não sendo ainda possível observar os canais de escape de gases. Observa-se que os escapes de material laterais já não encheram na sua totalidade (ver Figura 164), bem como marcas de fluxo na zona de injeção. Estas marcas devem-se ao facto de o material na frente ir solidificando e a pressão não ser suficiente para “empurrar” o metal.



Figura 164 - Ensaio H12 - MZ3PI01TI05PM08TM05MIEFLEGT465 – Peça com marcas de fluxo e fissura central

Tabela 100 - Ensaio H13 - MZ3PI01TI05PM03TM05MIEFLEGT465

<b>H13</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	0,1	bar
	Tempo de injeção	0,5	seg
	Pressão de manutenção	0,3	seg
	Tempo de manutenção	0,5	seg

Temperatura do Cadinho:  
465°C

Numa nova aproximação, reduziu-se a pressão de manutenção, sendo desta forma possível observar um dos escapes de gases criado (o que está no cimo da peça, no sentido em que flui o material - ver Figura 165). O segundo escape de gases não é possível de verificar pois não fica no sentido da injeção do metal. Nesta iteração, pelos diminutos valores de pressão utilizados, observam-se diversas fissuras ao longo da peça.



Figura 165 - Ensaio H13 - MZ3PI01TI05PM03TM05MIEFLEGT465 – Peça com marcas de fluxo e falha de material na zona de injeção, é possível observar um dos escapes de gases

Tabela 101 - Ensaio H14 - MZ3PI02TI05PM03TM05MIEFLEGT465

<div>H14</div> <div>Temperatura do Cadinho: 465°C</div>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	0,2	bar
	Tempo de injeção	0,5	seg
	Pressão de manutenção	0,3	seg
	Tempo de manutenção	0,5	seg

Neste ensaio, mantendo os parâmetros e aumentando ligeiramente a pressão de injeção, obteve-se uma peça bastante mais moldada e com menos defeitos. No entanto, ainda se observa, na Figura 166, preenchimento deficiente num dos pinos e fissura na zona de injeção do Zamak.



Figura 166 - Ensaio H14 - MZ3PI02TI05PM03TM05MIEFLEGT465 – Peça com fissura na zona de injeção e preenchimento deficiente

Tabela 102 - Ensaio H15 - MZ3PI01TI05PM01TM05MIEFLEGT465

<b>H15</b> Temperatura do Cadinho: 465°C	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	0,1	bar
	Tempo de injeção	0,5	seg
	Pressão de manutenção	0,1	seg
	Tempo de manutenção	0,5	seg

Diminuindo ao máximo ambas as pressões, verifica-se que todos os defeitos voltam a surgir, sendo que é novamente visível o escape de gases na parte de cima da peça. Ao reduzir a pressão, o material consegue fluir naturalmente por onde existir espaço, pois não existem tantas tensões no material que o impeçam. Ver Figura 167.



Figura 167 - Ensaio H15 - MZ3PI01TI05PM01TM05MIEFLEGT465 – Peça com escape de gases notório e diversas fissuras

Tabela 103 - Ensaio H16 - MZ3PI05TI05PM01TM05MIEFLEGT465

<b>H16</b> Temperatura do Cadinho: 465°C	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	0,5	bar
	Tempo de injeção	0,5	seg
	Pressão de manutenção	0,1	seg
	Tempo de manutenção	0,5	seg

Nesta iteração, aumentou-se apenas a pressão de injeção, fazendo com que a peça ficasse bastante mais moldada e completa. Registou-se, assim, preenchimento deficiente nos pinos, o qual se pode observar na Figura 168.



Figura 168 - Ensaio H16 - MZ3PI05TI05PM01TM05MIEFLEGT465 – Peça com preenchimento deficiente nos pinos



Tabela 104 - Ensaio H17 - MZ3PI01TI01PM01TM05MIEFLEGT465

<b>H17</b> Temperatura do Cadinho: 465°C	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	0,1	bar
	Tempo de injeção	0,1	seg
	Pressão de manutenção	0,1	seg
	Tempo de manutenção	0,5	seg

Como se pretendia que a peça não injetasse na totalidade, de modo a ser possível observar o fluxo de enchimento, para comprovar que este não foi alterado, reduziu-se novamente a pressão de injeção e o tempo. No entanto, apesar de existir preenchimento deficiente, não se conseguiu atingir esse objetivo. Ver Figura 169.



Figura 169 - Ensaio H17 - MZ3PI01TI01PM01TM05MIEFLEGT465 – Peça com preenchimento deficiente

Tabela 105 - Ensaio H18 - MZ3PI01TI01PM01TM03MIEFLEGT465

<b>H18</b> Temperatura do Cadinho: 465°C	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	0,1	bar
	Tempo de injeção	0,1	seg
	Pressão de manutenção	0,1	seg
	Tempo de manutenção	0,3	seg

Tendo em mente o objetivo da última iteração, reduziu-se o tempo de pressão de manutenção. Assim, já foi possível obter o resultado esperado. O preenchimento deficiente da peça permite verificar que o fluxo de enchimento permanece o mesmo (ver a Figura 170), desde que a peça foi invertida no molde.



Figura 170 - Ensaio H18 - MZ3PI01TI01PM01TM03MIEFLEGT465 – Peça com preenchimento deficiente e onde é perceptível o fluxo de enchimento

Tabela 106 - Ensaio H19 - MZ3PI02TI01PM03TM05MIEFL

<b>H19</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	0,2	bar
	Tempo de injeção	0,1	seg
	Pressão de manutenção	0,3	seg
	Tempo de manutenção	0,5	seg

Temperatura do Cadinho:  
465°C

Nesta iteração, o objetivo já foi o enchimento da peça, evitando ao máximo os defeitos. O único defeito encontrado, além do aspeto superficial da peça, é rebarba na zona do escape de material, visível na Figura 171.



Figura 171 - Ensaio H19 - MZ3PI02TI01PM03TM05MIEFL – Peça com fraca qualidade no aspeto visual e rebarba no escape de material frontal

Tabela 107 - Ensaio H20 - MZ3PI02TI02PM03TM05MIEFLEGT465

<b>H20</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	0,2	bar
	Tempo de injeção	0,2	seg
	Pressão de manutenção	0,3	seg
	Tempo de manutenção	0,5	seg

Temperatura do Cadinho:  
465°C

Mantendo uma baixa pressão de injeção, e aumentando ligeiramente o tempo de atuação, é possível observarem-se os dois escapes de gases criados. Aqui, o tempo de



injeção é elevado para a pressão de injeção utilizada, sendo que também aparece uma fissura perpendicular à direção da injeção do metal, tal como se observa na Figura 172.



Figura 172 - Ensaio H20 - MZ3PI02TI02PM03TM05MIEFLEGT465 – Peça com ambos os escapes de gases visíveis e com uma fissura perpendicular à direção de injeção

Tabela 108 - Ensaio H21 - MZ3PI05TI02PM08TM02MIEFLEGT465

<b>H21</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	0,5	bar
	Tempo de injeção	0,2	seg
	Pressão de manutenção	0,8	seg
	Tempo de manutenção	0,2	seg

Temperatura do Cadinho:  
465°C

Nesta iteração, verifica-se que o tempo de injeção é baixo para a pressão utilizada, isto porque se verifica preenchimento deficiente nos pinos traseiros. Também nesta peça se verifica uma fissura central, mas paralela à direção da injeção do metal. Ver Figura 173.



Figura 173 - Ensaio H21 - MZ3PI05TI02PM08TM02MIEFLEGT465 – Peça com uma fissura paralela à direção da injeção do metal

Tabela 109 - Ensaio H22 - MZ3PI08TI02PM1TM02MIEFLEGT465

<b>H22</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	0,8	bar
	Tempo de injeção	0,2	seg
	Pressão de manutenção	1	seg
	Tempo de manutenção	0,2	seg

Temperatura do Cadinho:  
465°C

Nesta iteração, a peça ficou bastante mais moldada e com menos defeitos. Apenas se verifica um ligeiro preenchimento deficiente num dos pinos traseiros. Ver Figura 174.



Figura 174 - Ensaio H22 - MZ3PI08TI02PM1TM02MIEFLEGT465 – Peça com ligeira preenchimento deficiente no pino traseiro assinalado

Tabela 110 - Ensaio H23 - MZ3PI01TI05PM08TM02MIEFLEGT465

<div>H23</div> <div>Temperatura do Cadinho: 465°C</div>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	1	bar
	Tempo de injeção	0,5	seg
	Pressão de manutenção	0,8	seg
	Tempo de manutenção	0,2	seg

Aumentando a pressão de injeção e o seu tempo, já não se verifica preenchimento deficiente. O aspeto exterior da peça é semelhante à iteração anterior, existindo também bastante rebarba. No entanto, estranhamente, a rebarba concentra-se maioritariamente no canal de injeção. Perto da zona de injeção existe um poro, provavelmente devido a sujidade que pudesse estar no molde, o qual pode ser observado na Figura 175.

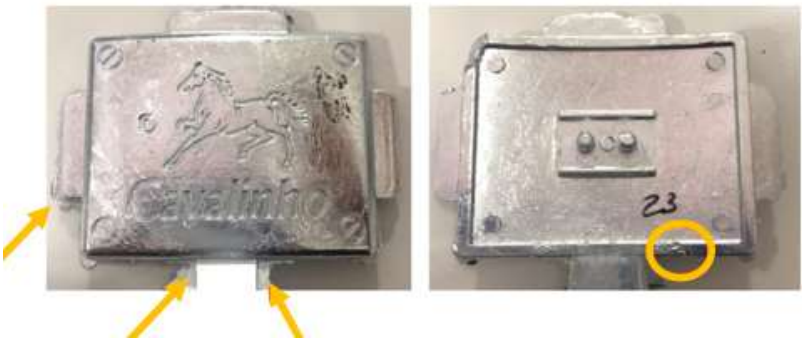


Figura 175 - Ensaio H23 - MZ3PI01TI05PM08TM02MIEFLEGT465 – Peça com marcas de fluxo e poro junto à zona de injeção do material

Percebe-se que o escape de gases ajudou significativamente na qualidade das peças obtidas. Até ao momento, o que se torna necessário diluir é a fraca qualidade no aspeto superficial da peça. Isto só poderá ser atingido com uma alteração no molde.

3.6.5. Molde nitfurado

Tendo em conta os resultados obtidos e a conclusão anteriormente apresentada, foi enviado o molde para nitfuraco e realizado novo ensaio para observar os efeitos desta ação.

Tabela 111 - Ensaio I1 - MZ3PI1TI4PM1TM2MINEFLEG

<b>I1</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Pressão de injeção</b>	1	bar
	<b>Tempo de injeção</b>	4	seg
	<b>Pressão de manutenção</b>	1	seg
	<b>Tempo de manutenção</b>	2	seg

Nesta primeira iteração, utilizaram-se valores de pressão altos, tendo em consideração os valores utilizados no ensaio passado. Verifica-se, desde logo, uma diferença extremamente significativa na qualidade superficial do molde (ver Figura 176). Ainda assim, e apesar dos valores utilizados em cada parâmetro, a peça não encheu na sua totalidade. Verifica-se, portanto, preenchimento deficiente nas peças obtidas e uma depressão na zona de injeção.



Figura 176 - Ensaio I1 - MZ3PI1TI4PM1TM2MINEFLEG – Peça com preenchimento deficiente e depressão na zona de injeção do metal (parte frontal da peça)

Tabela 112 - Ensaio I2 - MZ3PI1TI2PM15TM2MINEFLEG

<b>I2</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Pressão de injeção</b>	1	bar
	<b>Tempo de injeção</b>	2	seg
	<b>Pressão de manutenção</b>	1,5	seg
	<b>Tempo de manutenção</b>	2	seg

Reduzindo o tempo de injeção, obtm-se uma peça mais completa do que as anteriores, como se pode ver na Figura 177, mas ainda com acentuada moldagem deficiente.

Verifica-se também, claramente, a formação de uma gota fria, num dos locais de união de metal, segundo o fluxo de injeção da peça.

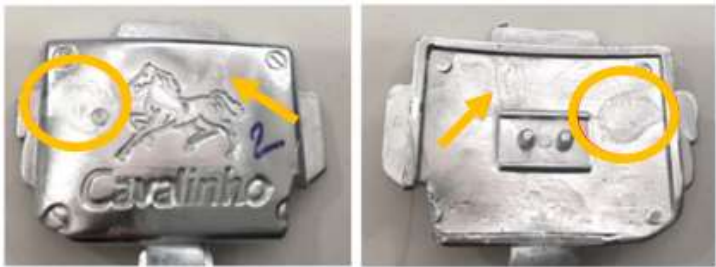


Figura 177 - Ensaio I2 - MZ3PI1TI2PM15TM2MINEFLEG – Peça com marcas de fluxo e gota fria destacada na imagem, à direita

Tabela 113 - Ensaio I3 - MZ3PI1TI05PM08TM2MINEFLEG

I3	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	1	bar
	Tempo de injeção	0,5	seg
	Pressão de manutenção	0,8	seg
	Tempo de manutenção	2	seg

As peças obtidas nesta iteração, apesar de mais moldadas, ainda apresentam preenchimento deficiente e surgem também com uma fissura central ao longo de toda a peça. Verifica-se que, ao longo dos ensaios, o molde tem vindo a apresentar desnivelamento, sendo que o lado direito da peça enche mais depressa do que o esquerdo. Estas peças são exemplo disso, onde se observa que o lado direito das peças está cheio e bem moldado, enquanto o lado esquerdo tem falta de material, apresentando marcas de gotas frias e menor definição. Ver Figura 178.



Figura 178 - Ensaio I3 - MZ3PI1TI05PM08TM2MINEFLEG – Peça com evidente desnivelamento no molde e defeitos como gotas frias, marcas de junção do metal, fissuras e preenchimento deficiente

Tabela 114 - Ensaio I7 - MZ3PI1TI05PM1TM05MINEFLEG

17	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	2	bar
	Tempo de injeção	0,5	seg
	Pressão de manutenção	1	seg
	Tempo de manutenção	0,5	seg

Nesta iteração, observa-se uma clara melhoria na qualidade exterior da peça e um aspeto bastante “limpo”, sem entropia visual. Nitidamente, o molde está desnivelado. Isto verifica-se facilmente nesta peça, onde o lado direito se encontra bastante definido, e o lado esquerdo não. Junto da letra “C” observa-se uma gota fria causada pelo desequilíbrio durante a injeção, que se pode verificar na Figura 179.



Figura 179 - Ensaio I7 - MZ3PI1TI05PM1TM05MINEFLEG – Peça com gota fria junto à letra “C”

Tabela 115 - Ensaio I8 - MZ3PI2TI01PM1TM05MINEFLEG

18	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	2	bar
	Tempo de injeção	0,1	seg
	Pressão de manutenção	1	seg
	Tempo de manutenção	0,5	seg

Diminuindo o tempo de injeção, o metal é obrigado a espalhar-se mais depressa, mas com uma pressão igual ao que injetou anteriormente. Neste caso, o curto tempo de injeção fez com que a peça ficasse completa, mas não totalmente cheia, com pouca definição, sendo possível observar, na Figura 180, o escape de gases junto do canal de injeção e também algumas fissuras.





Figura 180 - Ensaio I8 - MZ3PI2TI01PM1TM05MINEFLEG – Peça com escape de gases visível e diversas fissuras acentuadas

Tabela 116 - Ensaio I9 - MZ3PI6TI02PM3TM05MINEFLEG

I9	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	6	bar
	Tempo de injeção	0,2	seg
	Pressão de manutenção	3	seg
	Tempo de manutenção	0,5	seg

Esta iteração serviu para testar a pressão de injeção máxima possível, que é a pressão da rede: 6 bar. Observa-se uma gota fria, no mesmo local já anteriormente identificado, uma fissura central, preenchimento deficiente nos pinos e algumas rebarbas, apesar de a definição no centro da peça não ser a ideal. Ao contrário do que se tem vindo a verificar, o aumento exponencial de pressão trouxe, no geral, bons resultados à peça obtida. Ver Figura 181.



Figura 181 - Ensaio I9 - MZ3PI6TI02PM3TM05MINEFLEG – Peça com bom aspeto visual mas com uma gota fria e fissura central

Tabela 117 - Ensaio I10 - MZ3PI6TI1PM3TM05MINEFLEG

I10	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	6	bar
	Tempo de injeção	1	seg
	Pressão de manutenção	3	seg
	Tempo de manutenção	0,5	seg

Aumentando o tempo de enchimento obtêm-se ainda melhores resultados, sendo que a definição no centro da peça é muito maior, apesar de continuar a existir preenchimento deficiente e uma fissura central. Ver Figura 182.



Figura 182 - Ensaio I10 - MZ3PI6TI1PM3TM05MINEFLEG – Peça com preenchimento deficiente e fissura central

Tabela 118 - Ensaio I11 - MZ3PI5T1PM3TM05MINEFLEG

I11	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	5	bar
	Tempo de injeção	1	seg
	Pressão de manutenção	3	seg
	Tempo de manutenção	0,5	seg

Reduzindo ligeiramente a pressão, verifica-se um melhor enchimento da peça, sendo que o único defeito verificado são algumas marcas de fluxo, demonstradas na Figura 183.



Figura 183 - Ensaio I11 - MZ3PI5T1PM3TM05MINEFLEG – Peça com algumas marcas de fluxo

Tabela 119 - Ensaio I12 - MZ3PI5TI2PM03TM05MINEFLEG

I12	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	5	bar
	Tempo de injeção	2	seg
	Pressão de manutenção	3	seg
	Tempo de manutenção	0,5	seg



Dobrando o tempo de injeção, obtêm-se também resultados muito positivos, tal como na iteração anterior. Ver Figura 184.

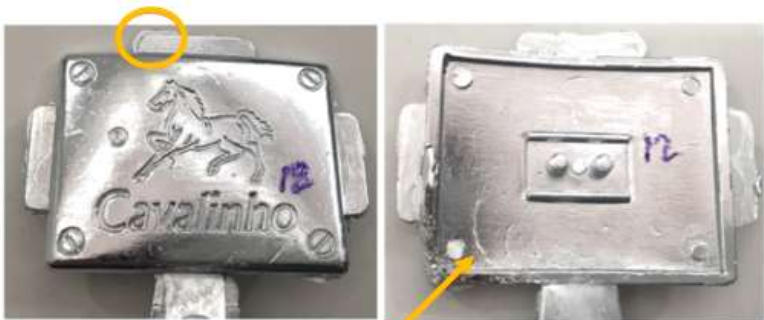


Figura 184 - Ensaio I12 - MZ3PI5TI2PM03TM05MINEFLEG – Peça com bom aspeto visual mas com marcas de fluxo perto da zona de injeção

Após obtenção dos resultados satisfatórios nas iterações 11 e 12 deste ensaio, realizaram-se mais algumas iterações apenas para perceber a influência dos diversos parâmetros de injeção.

Tabela 120 - Ensaio I14 - MZ3PI15TI1PM1TM05MINEFLEG

I14	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	1,5	bar
	Tempo de injeção	1	seg
	Pressão de manutenção	1	seg
	Tempo de manutenção	0,5	seg

Com os valores utilizados não foi possível obter uma peça completa e, ao contrário do que se tem vindo a verificar neste ensaio, o lado esquerdo encheu primeiro, sendo que o lado direito não foi completamente preenchido, como se pode ver na Figura 185.



Figura 185 - Ensaio I14 - MZ3PI15TI1PM1TM05MINEFLEG – Peça incompleta e com desnivelamento no molde, o que causa rebarbas num dos escapes laterais

Tabela 121 - Ensaio I16 - MZ3PI15TI05PM1TM05MINEFLEG

<b>I16</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	1,5	bar
	Tempo de injeção	0,5	seg
	Pressão de manutenção	1	seg
	Tempo de manutenção	0,5	seg

Reduzindo o tempo de injeção a peça fica mais completa, mas com menor definição (ver Figura 186), verificando-se algumas juntas frias de material.



Figura 186 - Ensaio I16 - MZ3PI15TI05PM1TM05MINEFLEG – Peça com preenchimento deficiente e juntas frias

Tabela 122 - Ensaio I17 - MZ3PI13TI02PM1TM05MINEFLEG

<b>I17</b>	Parâmetros	Valor	Unidade
	Pressão de injeção	1,3	bar
	Tempo de injeção	0,2	seg
	Pressão de manutenção	1	seg
	Tempo de manutenção	0,5	seg

Nesta iteração, utilizou-se um valor de pressão ligeiramente menor, bem como o valor do tempo de injeção. Estes valores não trouxeram resultados positivos para a peça obtida. Verifica-se, por observação da Figura 187, uma fissura a todo o comprimento da peça, marcas de arrefecimento, marcas de fluxo, falta de definição e preenchimento deficiente.



Figura 187 - Ensaio I17 - MZ3PI13TI02PM1TM05MINEFLEG – Peça com marcas de fluxo, marcas de arrefecimento e fissura central a todo o comprimento

Atendendo a esta série de testes, verifica-se que, após a nitruração do molde, os resultados foram visivelmente melhores e, contrariamente ao que tinha vindo a ser provado nos ensaios anteriores, a pressão de injeção deve ser elevada (cerca de 5 bar), para melhor acomodação do material na cavidade.

A nova matriz de resultados apresenta-se de seguida.

Tabela 123 - Matriz de Resultados do lote de ensaios com molde nitrurado

Zamak 3	Resultado com aumento	Resultado com diminuição	Principal defeito verificado	Valores máximos aceitáveis	Valores mínimos aceitáveis
da Pressão de injeção	Surgem fissuras.	Material não acomodado na cavidade.	Preenchimento deficiente, fissuras.	5	2
do Tempo de enchimento	Gotas frias, marcas de linhas de junta.	Preenchimento deficiente.	Preenchimento deficiente.	2	1
da Pressão de manutenção	Fissuras.	Diminuição da qualidade superficial da peça.	Marcas de fluxo.	3	2
do Tempo de manutenção	Marcas de fluxo, fissuras.	Não se verificam resultados.	Fissuras em toda a peça.	0,5	0,5

Após conclusão do ensaio, foram injetadas algumas peças com os parâmetros utilizados nas iterações 11 e 12 para enviar para granalhagem. De modo a que fosse possível identificá-las após mistura durante o processo de granalhagem, optou-se por retirar o jito das peças com os parâmetros da iteração 12.

O resultado observa-se nas fotos de seguida apresentadas (Figura 188 e Figura 189).

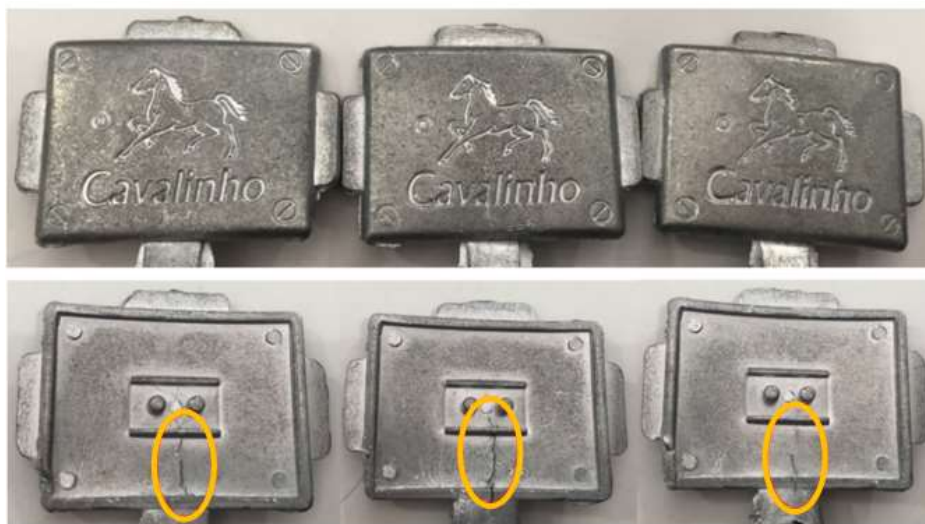


Figura 188 - Peças granalhadas - injetadas com os parâmetros da iteração I11

As peças obtidas na iteração I11 possuem boa definição e um aspeto bastante liso. No entanto, todas elas apresentam uma fissura central muito acentuada. Nas peças seguintes obtidas na iteração I12) isso já não se observa, verificando-se apenas algumas marcas de fluxo.



Figura 189 - Peças granalhadas - injetadas com os parâmetros da iteração I12

Após granalhagem, uma das peças com parâmetros I12 foi polida manualmente, obtendo um aspeto extremamente positivo, como se pode verificar na Figura 190, com

definição e extremamente liso, pronto para efetuar a aplicação de um revestimento final.



Figura 190 - Peça granalhada e polida manualmente

Após análise de todos os ensaios realizados, verifica-se um problema comum: a geração de turbulência, a qual causa fissuras, marcas de fluxo, tensões indesejadas, etc.. Este problema deve-se, essencialmente, à existência de uma parede logo à entrada do material na cavidade.

Como demonstrado na Figura 191, a seguir apresentada, verifica-se que o material, ao entrar na cavidade, segue no sentido perpendicular a uma parede (1). Isto faz com que o metal retorne na direção contrária e se gerem tensões indesejadas (2), provocando um remoinho constante até à solidificação do material (3). Ao existir a turbulência, e continuando a injeção do metal, este é obrigado a injetar pela parte inferior do canal (4) de injeção e provoca remoinho por cima, situação que faz com que existam peças que apresentam uma falha de material na zona de injeção (Figura 192).

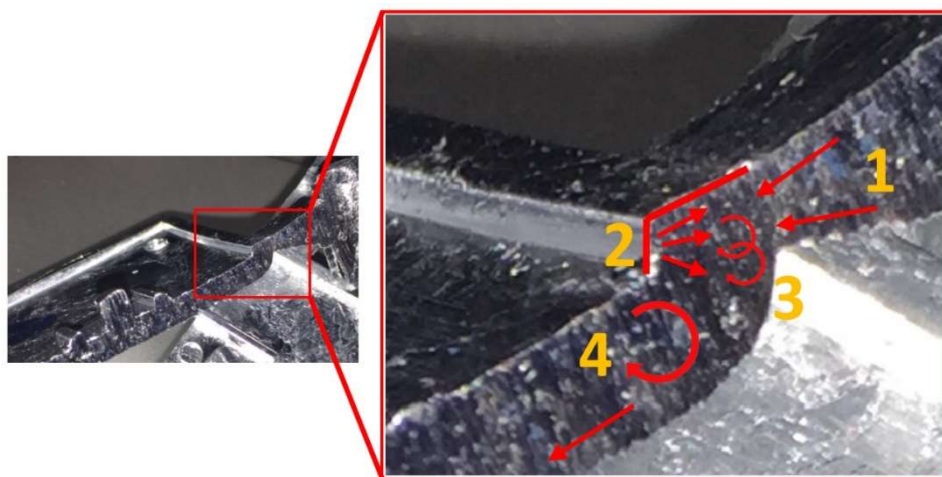


Figura 191 - Esquema do fluxo do material na zona da injeção do metal



Figura 192 - Exemplo de peça com falha de material na zona de injeção, devido ao fluxo turbulento

Por todo o problema apresentado, decidiu-se que poderia ser realizada uma atenuação deste ângulo, criando uma rampa para que o metal flua mais facilmente, reduzindo a criação de tensões prejudiciais para o bom enchimento e compactação da peça.

A idealização dessa rampa está apresentada na Figura 193, demarcada a azul. Com esta solução, provavelmente, o material fluirá muito mais facilmente para toda a cavidade, reduzindo quase todas as tensões negativas e permitindo alcançar o resultado pretendido.

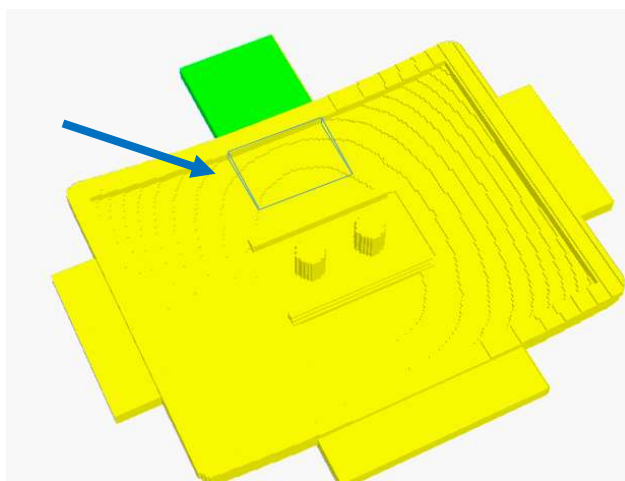


Figura 193 - Rampa a realizar para que as tensões no momento da injeção sejam reduzidas

No entanto, não foi possível realizar esta alteração no molde, em tempo útil, pelo que esta será apontada como um trabalho futuro a realizar para melhorar as condições de injeção das peças.

# CONCLUSÕES

4.1 PREÂMBULO

4.2 RESULTADOS FINAIS

4.3 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS



## 4 CONCLUSÕES

### 4.1 Preâmbulo

É importante lembrar que o objetivo deste estudo se prendia com a obtenção de peças estéticas, através da injeção de Zamak, sem defeitos na sua superfície. Com as condições iniciais (molde original + Zamak 5) foi impossível chegar a um resultado minimamente satisfatório. Através do estudo de várias vertentes do sistema, percebeu-se que o Zamak 5 não seria o material indicado para a injeção de peças estéticas. Assim, introduziu-se a utilização do Zamak 3, que apresenta maior fluidez, e que é um material próprio para peças deste caráter. Com esta alteração, observou-se uma diferença significativa no fluxo do material na cavidade.

Desta forma, e por não se ter obtido o resultado pretendido, efetuaram-se várias simulações numéricas do fluxo de material, variando a configuração do molde. Tentou-se efetuar algumas simulações de solidificação do material mas, por limitação de processamento informático, tal não foi possível obter. Dada a geometria da peça envolvida, é necessário utilizar uma *mesh* fina, caso contrário os resultados serão inválidos pois não terão em consideração os pormenores importantes na geometria da peça. Uma vez que, quanto mais fina for a *mesh*, mais cálculos o *software* terá de efetuar, não foi possível concluir a simulação.

Assim, apenas foi possível que o projeto se baseasse nos resultados obtidos nas simulações de fluxo de material. Nos ensaios realizados, utilizando Zamak 5 ou Zamak 3, observam-se as diferenças no fluxo do material, sendo que, relativamente ao Zamak 3, o fluxo real é exatamente o mesmo que o da simulação, o que traz validade aos resultados obtidos computacionalmente.

Após análise das várias simulações efetuadas e, tendo em conta que o problema principal na peça se encontrava no centro da mesma, que é a parte mais visível e a última a encher na cavidade, optou-se por inverter o molde na esperança de fazer uso da gravidade.

Verificaram-se algumas diferenças e melhorias, mas não se obtiveram os resultados que são pretendidos.

Nesta fase, percebeu-se que não seria possível injetar as peças, devido à sua geometria, sem que a programação da máquina tivesse de ser alterada para permitir parametrizar a injeção com uma segunda pressão (pressão de manutenção), bem como a bomba teria de ser substituída para permitir maior controlo em pressões baixas (na ordem de 1-2 bar). No entanto, como essa alteração envolvia um grande esforço por parte da empresa, tentou-se primeiro esgotar as hipóteses de injetar as peças nessas condições.

Assim, e verificando que o fluxo do material possuía várias linhas de união, o objetivo seria diminuir esse aspeto, introduzindo mais “espaço” para que o Zamak 3 pudesse fluir sem problemas. Primeiramente efetuou-se um escape de material frontal no molde, o qual nada resolveu, obrigando a optar-se por efetuar a abertura de escapes laterais.

Todas as alterações efetuadas até este momento melhoraram a injeção das peças, mas ainda não permitiram chegar ao resultado final pretendido.

Os grandes problemas sentidos são: preenchimento deficiente nos pinos, provoca agitação na superfície visível provocada pelo fluxo de material, causando defeitos e formação de fissura junto à zona de injeção da peça (na parte interior da peça).

Percebe-se que, apesar de todos os esforços, a injeção do metal fundido na peça se torna difícil por não existir uma pressão de manutenção que permita moldar o material depois de injetado.

## 4.2 Resultados finais

Dadas as conclusões obtidas ao longo do estudo da injeção da peça em questão, foi possível efetuar as alterações necessárias na máquina de injeção ZM3 para que permitisse parametrizar uma segunda pressão, a pressão de manutenção.

Assim, foram realizados ensaios no sentido de averiguar as diferenças obtidas com a parametrização das duas pressões. Os ensaios permitiram averiguar que a melhoria nas peças é visível, principalmente ao nível do enchimento (resultado expectável) mas que, ainda assim, podem existir gases aquando da solidificação do material que fazem com que o fluxo do material, na superfície da peça, não seja o pretendido, resultando em defeitos visíveis.

Foi então criado um escape de gases para o efeito. As diferenças foram notórias e foi possível injetar peças quase perfeitas. Para melhorar o seu aspeto, foram enviadas peças para granalhagem e algumas também para o polimento manual.

Estas ações permitiram perceber que, para obter peças semelhantes às peças objetivo, é necessário efetuar um polimento extra à granalhagem. Verifica-se que o polimento manual também é realizado nas peças que foram apresentadas inicialmente à PR-Metal, uma vez que as suas marcas na superfície são semelhantes às marcas obtidas por realização do polimento manual pela PR-Metal.

Após todo trabalho desenvolvido, desde o estudo do material, passando pelas simulações do fluxo, e pelas alterações necessárias ao molde e máquina injetora, conclui-se que todos os fatores são determinantes para o sucesso da injeção perfeita das peças. Foi possível verificar que o próprio bico de injeção influencia bastante o resultado na injeção das peças, bem como a bomba utilizada na máquina.

A PR-Metal, de momento, não possui estrutura para o mercado das peças estéticas pois, para isso, necessitaria de melhorar todas estas variáveis faladas nas suas máquinas de injeção fundida.

#### 4.3 Sugestão de trabalhos futuros

No final da realização deste estudo é possível apontar alguns pontos que poderão merecer atenção no futuro. Estes pontos poderão ser o ponto de partida para novos testes, análise do comportamento do material e melhoria a nível de processo de produção das peças.

Pontos para trabalhos futuros:

- Criação de uma rampa na zona de injeção do material;
- Estudar o impacto do bico usado na injeção;
- Estudar novo molde;
- Ferramenta para corte das peças (para extração do jito e escapes de material);
- Método para extração das peças do molde.



# **BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO**

## 5. BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- [1] J. Campbell, The new metallurgy of cast metals - Second edition, Elsevier.
- [2] “heARTJÓIA,” [Online]. Available: <http://www.heartjoia.com/5007-fundicao-prata-osso-choco>.
- [3] C. Lobo, “Fundição,” em *Fundição V01*.
- [4] P. Beeley, Foundry Technology, Butterworth - Heinemann, 2001.
- [5] Guide to Casting and Molding Processes - ENGINEERED CASTING SOLUTIONS, CASTING SOURCE DIRECTORY, 2006.
- [6] “Processos de fabricação - Fundição”.
- [7] “The Metal Casting,” [Online]. Available: <http://www.themetalcasting.com/casting-process.html>. [Acedido em Abril 2017].
- [8] “Industrial Metal Castings,” [Online]. Available: [http://www.industrialmetalcastings.com/casting\\_lost\\_foam\\_casting.html](http://www.industrialmetalcastings.com/casting_lost_foam_casting.html). [Acedido em Fevereiro 2017].
- [9] “Submarine Boat,” [Online]. Available: [http://www.submarineboat.com/lost\\_foam\\_casting.htm](http://www.submarineboat.com/lost_foam_casting.htm). [Acedido em Fevereiro 2017].
- [10] “Investment Casting vs. Die Casting: 7 Considerations When Choosing a Process,” [Online]. Available: <http://news.ewmfg.com/blog/investment-casting-vs.-die-casting-considerations-when-choosing-process>.
- [11] “Expandable pattern casting and plaster mold casting,” [Online]. Available: <http://www.slideshare.net/msol0829/expandable-pattern-casting-and-plaster-mold-casting>.
- [12] “Metal Casting Processes - Expendable mold casting,” [Online]. Available: <http://www.slideshare.net/abhinav1234546/3expendable-mold-casting>.
- [13] M. S. R. a. M. N. Srinivasan, Permanent Molding of Cast Irons – Present Status and Scope, Science and Technology of Casting Processes, Prof. Malur Srinivasan (Ed.), InTech, 2012.
- [14] “Int tech open,” [Online]. Available: <https://www..com/books/science-and-technology-of-casting-processes/permanent-molding-of-cast-irons-present-status-and-scope>. [Acedido em Março 2017].
- [15] Permanent Mold Technology, Technikon.LLC and Material Applications Branch, 2004.
- [16] T. E. G. Charles. E. West, Chapter on Permanent Mold casting, ASM Metals Hand Book, Volume 15, (Aluminum Company of America) CastingsFourth Printing, 1998.
- [17] “Custom part net,” [Online]. Available: <http://www.custompartnet.com/wu/permanent-mold-casting>. [Acedido em 2017].
- [18] “Investacast,” 2017. [Online]. Available: <http://www..com/outsourcing/gravity-die-casting>.



- [19] “Alteams,” 2017. [Online]. Available: <http://www.alteams.com/alteams-tech-centre/casting-methods/gravity-die-casting.html>.
- [20] “Flow 3D,” [Online]. Available: <https://www.flow3d.com/industries/metal-casting/permanent-mold/lpdc/>. [Acedido em Abril 2017].
- [21] “Enginsoft,” [Online]. Available: <http://www.enginsoft.com/technologies/metal-process-simulation/low-pressure-permanent-mold-casting.html>. [Acedido em Abril 2017].
- [22] “Alteams,” [Online]. Available: <http://www.alteams.com/alteams-tech-centre/casting-methods/low-pressure-die-casting.html>. [Acedido em Abril 2017].
- [23] “The Metal Casting,” [Online]. Available: <http://www.themetalcasting.com/pressure-die-casting.html#LowPressureDieCasting>. [Acedido em Abril 2017].
- [24] A. S. f. Metals, Metals Handbook: Casting (Volume 15) Ninth Edition, Hardcover, 1980.
- [25] “Metal Tek,” [Online]. Available: <https://www.metaltek.com/capabilities/processes/metal-casting/centrifugal-casting>. [Acedido em Abril 2017].
- [26] “Efunda,” [Online]. Available: [http://www.efunda.com/processes/metal\\_processing/centri\\_casting.cfm](http://www.efunda.com/processes/metal_processing/centri_casting.cfm). [Acedido em Abril 2017].
- [27] “Manufacturing Guide,” [Online]. Available: <https://www.manufacturingguide.com/en/semi-centrifugal-casting>. [Acedido em Abril 2017].
- [28] “Slideshare,” [Online]. Available: <https://www.slideshare.net/klivsie/ch11-9297659>. [Acedido em Abril 2017].
- [29] M. P. Groover, Fundamentals of Modern Manufacturing, 4th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [30] “Sand casting process,” [Online]. Available: <http://www.francismanufacturing.com/capabilities/sand-casting-process.aspx>.
- [31] “First Rate Mold,” [Online]. Available: <http://www.firstratemold.com/about-us/c19-news/advantages-and-disadvantages-of-die-casting/>. [Acedido em Abril 2017].
- [32] “Ezine @rticles,” [Online]. Available: <http://ezinearticles.com/?Die-Casting---Advantages-and-Disadvantages&id=3901063>. [Acedido em Abril 2017].
- [33] “Die Casting,” [Online]. Available: <http://www.custompartnet.com/wu/die-casting>.
- [34] “Horizontal Cold Chamber Die Casting Machines,” [Online]. Available: [http://www.diytrade.com/china/pd/5533417/Horizontal\\_Cold\\_Chamber\\_Die\\_Casting\\_Machines\\_J1113H.html#normal\\_img](http://www.diytrade.com/china/pd/5533417/Horizontal_Cold_Chamber_Die_Casting_Machines_J1113H.html#normal_img).
- [35] A. Syllabus, “Production Process I. Introduction,” [Online]. Available: <http://slideplayer.com/slide/6163447/>.
- [36] “Die Casting,” [Online]. Available: <http://www.custompartnet.com/wu/die-casting>.
- [37] “Automatic hot chamber die casting machine,” [Online]. Available: <http://www.qxldiecasting.com/products/show-356.html>.

- [38] E. -. M. Technology, "Metal Casting," [Online]. Available: <http://slideplayer.com/slide/4879935/>.
- [39] I. M. P. G. John Wiley & Sons, "Fundamentals of Modern Manufacturing," [Online]. Available: <http://slideplayer.com/slide/3475540/>.
- [40] "First Rate Model," [Online]. Available: <http://www.firstratemold.com/about-us/c19-news/advantages-and-disadvantages-of-die-casting/>. [Acedido em Abril 2017].
- [41] "Ezine @rticles," [Online]. Available: <http://ezinearticles.com/?Die-Casting---Advantages-and-Disadvantages&id=3901063>. [Acedido em Abril 2017].
- [42] P. N. P. D. d. Castro, "Analisar e Estabilizar o Processo de Fundição Injetada de Alumínio para Minimizar a Rejeição no Produto," Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [43] "Defects of diecast products (2nd part)," [Online]. Available: [http://www.facealuminium.com/ENG/Hot\\_topics/Techical\\_papers/Defects\\_of\\_diecast\\_products2.asp](http://www.facealuminium.com/ENG/Hot_topics/Techical_papers/Defects_of_diecast_products2.asp).
- [44] R. Rajkolhe e J. G. Khan, "Defects, Causes and Their Remedies in Casting Process;," *International Journal of Research in Advent Technology*, Março 2014.
- [45] "Defeitos de solidificação," 30 03 2010. [Online]. Available: [http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir\\_noticia/6751-defeitos-de-solidificacao](http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/6751-defeitos-de-solidificacao).
- [46] C. F. Rick, "ESTUDO DA LIGA À BASE DE Zn-Al-Cu-Mg APLICADA NA FABRICAÇÃO DE JÓIAS FOLHADAS," PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL, Porto Alegre, 2006.
- [47] "Principais Defeitos," [Online]. Available: <https://sites.google.com/site/tecnologiaprocessometalurgico/fundicao-ii/principais-defeitos>.
- [48] E. F. B. JR., "DEFEITOS EM PEÇAS FABRICADAS PELO PROCESSO DE FUNDIÇÃO".
- [49] M. e. Al., "SUSCEPTIBILIDADE À FADIGA TÉRMICA DE MATRIZES FECHADAS PARA FORJAMENTO A QUENTE," 2014.
- [50] "Zamac," [Online]. Available: <http://www.zincoligas.com.br/zamac/>.
- [51] "Zamak," [Online]. Available: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Zamak>.
- [52] "zinc alloys - Benefits of Zamak and ZA-8," [Online]. Available: <http://www.inventix.com/zinc-die-casting/zamak-benefits.php>.
- [53] nyrstar, "Zinc Die Casting Alloys (ZAMAK) - Technical Datasheet," Junho 2013.
- [54] "Trincas para janelas," [Online]. Available: [https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/leroy-production/uploads/img/products/tranqueta\\_cr\\_zamac\\_87239383\\_0001\\_600x600.jpg](https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/leroy-production/uploads/img/products/tranqueta_cr_zamac_87239383_0001_600x600.jpg).
- [55] "Botões Metal/Zamak," [Online]. Available: <http://www.botoesparis.com/pt/botoes/metal-zamac/>.

- [56] “Porca Borboleta Zamak 1/2 (embalagem C/ 50 Peças),” [Online]. Available: [http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-714935969-porca-borboleta-zamak-12-embalagem-c-50-pecas-\\_JM](http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-714935969-porca-borboleta-zamak-12-embalagem-c-50-pecas-_JM).
- [57] “Tee 3/8 Bm Zamak,” [Online]. Available: <http://www.sofogoes.com/produto/conexoes-p-instal-de-gas/tee-38-bm-zamak/4713>.
- [58] “ESI - ProCAST/QuikCAST,” [Online]. Available: <http://www.ecotre.it/esi/>.
- [59] “Cornille Havard Foundry improves its productivity and expands its bell-casting market thanks to QuikCAST,” [Online]. Available: <https://www.esi-group.com/pt/empresa/sobre/customer-successes/cornille-havard-foundry-improves-its-productivity-and-expands-its-bell-casting-market-thanks>.
- [60] “Procast-Quikcast,” [Online]. Available: <https://www.esi-group.com/software-solutions/virtual-manufacturing/casting/procast-quikcast>.
- [61] “SALSA 3D, a Gating & Runner System Conception tool,” [Online]. Available: <https://www.esi-group.com/pt/solucoes-de-software/fabricacao-virtual/fundicao/applications/gating-conception-salsa-3d>.
- [62] “Flow-3D,” [Online]. Available: <https://www.flow3d.com/wp-content/uploads/2015/04/FLOW-3D-General-Brochure.pdf>.
- [63] I. Flow Science, Realizador, *Tilt pour casting: velocity contours and thermal gradients*. [Filme]. 2016.
- [64] H.-S. Park e X.-P. Dang, *Design and Simulation-Based Optimization of Cooling Channels for Plastic Injection Mold*, 2011.
- [65] S. L. Silva, “Sistemática para o Projeto do Sistema de Refrigeração de Moldes para Injeção de Polímeros,” Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- [66] “Sand Casting,” [Online]. Available: <http://www.custompartnet.com/wu/SandCasting>.
- [67] G. d. A. Soares, *Fundição: Mercado, Processos e Metalurgia*, 2000.
- [68] S. HURST, *METAL CASTING - Appropriate technology in the small foundry*, INTERMEDIATE TECHNOLOGY PUBLICATIONS, 1996.
- [69] M. Bauccio, *ASM Metals Reference Book*, ASM International, 1993.
- [70] *Metals Handbook, Vol.2 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, ASM International, 1990.
- [71] “megazinco,” [Online]. Available: <http://www.megazinco.com.br/pdfs/apresentacao.pdf>. [Acedido em 25 01 2017].
- [72] “Matweb,” [Online]. Available: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=46f8e9c00d144a3eb821fc438fdca237>. [Acedido em 11 2016].
- [73] “Matweb,” [Online]. Available: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=bb106cf30fba409d9a18bf7e0a2bc79&ckck=1>. [Acedido em 11 2017].

- [74] “Injazak,” [Online]. Available: [http://www.injazak.pt/wp-content/uploads/2012/12/IMG\\_2035.jpg](http://www.injazak.pt/wp-content/uploads/2012/12/IMG_2035.jpg).
- [75] V. Kondic, *Princípios Metalúrgicos da Fundição*, São Paulo: Editora Polígono (USP), 1973.
- [76] “The Metal Casting,” [Online]. Available: <http://www.themetalcasting.com/pressure-die-casting.html#LowPressureDieCasting>.
- [77] “efunda,” [Online]. Available: [http://www.efunda.com/processes/metal\\_processing/centri\\_casting.cfm](http://www.efunda.com/processes/metal_processing/centri_casting.cfm). [Acedido em Abril 2017].

# ANEXOS


6.1. ANEXO 1

6.2. ANEXO 2



## 6. ANEXOS

## 6.1. ANEXO 1

 <b>Composition and Properties of Zinc Alloys and Comparative Data for Other Materials</b>													
DESIGNATION	ALLOY GROUP	ZINC	ZINC	ZINC	ZINC	ZINC-ALUMINUM	ACuZinc	MAGNESIUM	ALUMINUM	PLASTIC	BRASS	POWDERED METAL	MILD STEEL
ASTM Designation		AC43A	AG40A	AC41A	AG40B						B16	B 428 grade 1	C1010
General Designation		ZAMAK 2	ZAMAK 3	ZAMAK 5	ZAMAK 7	ZA-8	ACuZinc 5	AZ-91D	380	Polypropylene	Nylon (30% Glass)	Brass 360	FC-0208-R as sintered
COMPOSITION PERCENTAGE BY WEIGHT													
Aluminum	3.5 - 4.3	3.5 - 4.3	3.5 - 4.3	3.5 - 4.3	8.0 - 8.8	2.5 - 3.3	8.3 - 9.7	—	—	—	—	—	—
Copper	2.5 - 3.0	0.25 Max.	0.75 - 1.25	0.25 Max.	0.8 - 1.3	5.0 - 6.0	0.03 Max.	—	—	—	—	—	—
Mg Magnesium	0.02 - 0.06	0.02 - 0.06	0.03 - 0.08	0.005 - 0.02	0.015 - 0.030	0.025 - 0.06	Remainder	—	—	—	—	—	—
Fe Iron (Maximum)	0.100	0.100	0.100	0.075	0.075	0.075	0.005	—	—	—	—	—	—
Pb Lead (Maximum)	0.005	0.005	0.005	0.003	0.006	0.005	0.02	—	—	—	—	—	—
Cd Cadmium (Maximum)	0.004	0.004	0.004	0.002	0.006	0.004	0.02	—	—	—	—	—	—
Sn Tin (Maximum)	0.003	0.003	0.003	0.001	0.003	0.003	0.02	—	—	—	—	—	—
Ni Nickel	—	—	—	0.005 - 0.020	—	—	0.002 Max.	—	—	—	—	—	—
Zn Zinc	Remainder	Remainder	Remainder	Remainder	Remainder	Remainder	0.35 - 1.0	—	—	—	—	—	—
PHYSICAL PROPERTIES													
Density													
kg/m <sup>3</sup>	666	660	670	660	630	680	1827	2713	900	1400	8600	6700	7900
lb/in <sup>3</sup>	0.240	0.238	0.242	0.24	0.227	0.247	0.066	0.098	0.032	0.06	0.307	0.242	0.283
Melting Range													
°C	379 - 390	381 - 387	380 - 386	381 - 387	375 - 404	402 - 502	458 - 596	538 - 603	—	—	885 - 900	N/A	1370
°F	715 - 734	718 - 728	717 - 727	718 - 728	707 - 759	756 - 936	875 - 1105	1000 - 1100	—	—	1630 - 1660	N/A	2500
Coefficient of Thermal Expansion													
µm/m·K	27.8	27.4	27.4	27.4	23.3	24.1	25.2	21.2	80 - 150	23 - 40	20.5	9.2	11.4
µin/in·°F	15.4	15.2	15.2	15.2	12.9	13.3	14.0	11.8	44 - 83	13 - 22	11.4	5.1	6.3
Thermal Conductivity													
W/m·K	104.7	113.0	108.9	113.0	114.7	106.0	72.3	96.2	0.16 - 0.24	0.5	115.0	44 (est.)	49.8
BTU/ft·hr·°F	60.5	65.3	62.9	65.3	66.3	61.2	41.8	56.6	0.002 - 0.139	0.29	67.0	25 (est.)	28.8
Electrical Conductivity													
10 <sup>4</sup> Ohm·m	68.4	63.9	66.3	63.9	62.2	64.0	141.0	63.9	N/A	N/A	66.0	N/A	143
%ACS	25.0	27.0	26.0	27.0	27.7	26.9	12.2	27.0	N/A	N/A	26.0	N/A	12.1
MECHANICAL PROPERTIES													
Tensile Strength													
MPa	369	283	328	283	374	407	234	324	33	120	379 - 470	415	365
psi	52,000	41,000	47,600	41,000	54,200	59,000	34,000	47,000	4,800	17,400	55,000 - 68,000	60,000	52,900
Yield Strength (0.2% offset)													
MPa	283	221	228	221	290	338	159	165	—	—	305 - 360	330	305
psi	41,000	32,000	33,000	32,000	42,000	49,000	23,000	24,000	—	—	44,000 - 52,000	48,000	44,200
Compressive Yield Strength (0.1% offset)													
MPa	641	414	600	414	252	N/A	165	N/A	—	—	N/A	N/A	N/A
psi	93,000	60,000	87,000	60,000	37,000	N/A	24,000	N/A	—	—	N/A	N/A	N/A
Elongation (% in 2 inches) (% in 51 mm)													
	7	10	7	13	8	5	3	3	>100	6	18 - 53	1	18
Shear Strength													
MPa	317	214	262	214	276	280	198	186	—	—	220 - 260	N/A	311
psi	46,000	31,000	38,000	31,000	40,000	40,500	28,000	27,000	—	—	32,000 - 38,000	N/A	45,000
Hardness													
HBN (Brinell)	up to 100	up to 82	up to 91	up to 80	up to 103	up to 115	up to 63	up to 80	—	—	120	110	124 - 162
Impact Strength													
J	47.5 <sup>1</sup>	58.3 <sup>1</sup>	65.1 <sup>1</sup>	58.3 <sup>1</sup>	42.0 <sup>1</sup>	N/A	6.0 <sup>1</sup>	4.0 <sup>1</sup>	—	—	N/A	6.8	N/A
ft. lbs.	35 <sup>1</sup>	43 <sup>1</sup>	48 <sup>1</sup>	43 <sup>1</sup>	31 <sup>1</sup>	N/A	5 <sup>1</sup>	3 <sup>1</sup>	—	—	N/A	5	N/A
Fatigue Strength (Rotary Bend 5x10 <sup>7</sup> cycles)													
MPa	58.6	47.6	55.5	46.9	103	N/A	97	138	13.8	17.2	138.0	155.0	N/A
psi	8,500	6,900	8,200	6,800	15,000	N/A	14,000	20,000	2,000	2,500	20,000	23,000	N/A
<i>Note: Data shown is typical for the material and process used and is intended for comparison and guidance only.</i>													
<i>Note: FisherCast die casts components in these alloys.</i>													
<sup>1</sup> 1/4 inch Unnotched Charpy <sup>2</sup> 10mm Unnotched Charpy													

## North American Operations

710 Neal Drive  
Peterborough, ON Canada K9J 6X7

Tel: (705) 748-9522  
Fax: (705) 748-8763  
Toll Free (U.S./Canada): 1 (800) 538-CAST (2278)  
E-mail: info@fishercast.com

## European Operations

1 Fisher Road, Offa's Dyke Business Park  
Walspool, Powys, Wales  
United Kingdom SY21 8JF

Tel: +44 1938 55 55 00  
Fax: +44 1938 55 80 56  
E-mail: info@fishercast.com

Call us for assistance  
with your small component  
design challenges.

www.fishercast.com



FisherCast is an approved supplier of General Motors Ltd.



DRIVEN BY CHALLENGES



POWERED BY PERFORMANCE



COMMITTED TO SOLUTIONS



BACKED BY EXPERIENCE



SHAPED BY INNOVATION

FisherCast - © 2008

MITIGAÇÃO DAS CAUSAS GERADORAS DE DEFEITOS EM PEÇAS METÁLICAS  
INJETADAS DE CARÁTER ESTÉTICO

DIANA CATARINA CAPELA FERRERA



## 6.2. ANEXO 2

June 2013



# Zinc Die Casting Alloys (ZAMAK)

## Technical Datasheet

### Uses

These alloys are ideal for mass production of strong accurate components e.g. by hot chamber die casting process.

### Characteristics

Chemical composition (EN1774) Guaranteed analysis (in %)	ZAMAK 2 ZL2/ZL0430 ZnAl4Cu3	ZAMAK 3 ZL3/ZL0400 ZnAl4	ZAMAK 5 ZL5/ZL0410 ZnAl4Cu1	ZA8 ZL8/ZL0810 ZnAl8Cu1
Al	3.8-4.2	3.8-4.2	3.8-4.2	8.2 - 8.8
Cu	2.7-3.3	≤ 0.03	0.7 - 1.1	0.9 - 1.3
Mg	0.035 - 0.06	0.035 - 0.06	0.035 - 0.06	0.02 - 0.03
Pb	≤ 0.003	≤ 0.003	≤ 0.003	≤ 0.005
Fe	≤ 0.020	≤ 0.020	≤ 0.020	≤ 0.035
Cd	≤ 0.003	≤ 0.003	≤ 0.003	≤ 0.005
Sn	≤ 0.001	≤ 0.001	≤ 0.001	≤ 0.002
Si	≤ 0.02	≤ 0.02	≤ 0.02	≤ 0.035
Ni	≤ 0.001	≤ 0.001	≤ 0.001	≤ 0.001
Typical analysis (in %) (reference 2008)	ZAMAK 2 ZL2/ZL0430 ZnAl4Cu3	ZAMAK 3 ZL2/ZL0400 ZnAl4	ZAMAK 5 ZL5/ZL0410 ZnAl4Cu1	ZA 8 ZL8/ZL0810 ZnAl8Cu1
Al	3.99826	4.08637	3.99826	8.42138
Cu	2.89784	0.00020	0.83732	1.06345
Mg	0.04271	0.04514	0.04402	0.02286
Pb	0.00271	0.00170	0.00183	0.00218
Fe	0.00305	0.00216	0.00238	0.00421
Cd	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0003
Sn	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Si	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.015
Ni	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Physical data	ZAMAK 2 ZL2/ZL0430 ZnAl4Cu3	ZAMAK 3 ZL2/ZL0400 ZnAl4	ZAMAK 5 ZL5/ZL0410 ZnAl4Cu1	ZA 8 ZL8/ZL0810 ZnAl8Cu1
Density (kg/dm <sup>3</sup> at 20 °C)	6.8	6.6	6.7	6.3
Solidification range (°C)	379-390	381-387	380-386	375-404
Shrinkage in %	4 - 5	4 - 5	4 - 5	8
Lin. thermal expansion (coef./°C)	27.8 x 10 <sup>-6</sup>	27.4 x 10 <sup>-6</sup>	27.4 x 10 <sup>-6</sup>	23.2 x 10 <sup>-6</sup>
Electrical conductivity (%IACS)	25	27	26	27.7

### Package

Trademark	OVERCOR ZAMAK	Claw end ingots
Ingot weight Ingots per bundle Packing/Weight Feet/pallet	8.3 kg 72 + 4 strapped bundles of about 650 kg zinc alloy feet	6.0 kg 96 strapped bundles of about 580 kg wooden pallet

Nyrstar Sales & Marketing AG • Tessinerplatz 7 • CH-8002 Zürich (Switzerland) • T +41 44 745 81 00 • F +41 44 745 81 10  
sales@nyrstar.com • www.nyrstar.com